

Der Open-Access-Publikationsserver der ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
The Open Access Publication Server of the ZBW – Leibniz Information Centre for Economics

Koschel, Henrike; Schmidt, Tobias F. N.

Research Report

Technologischer Wandel in AGE-Modellen: Stand der Forschung, Entwicklungsstand und -potential des GEM-E3-Modells

ZEW-Dokumentation, No. 97-01

Provided in cooperation with:

Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW)

Suggested citation: Koschel, Henrike; Schmidt, Tobias F. N. (1997) : Technologischer Wandel in AGE-Modellen: Stand der Forschung, Entwicklungsstand und -potential des GEM-E3-Modells, ZEW-Dokumentation, No. 97-01, <http://hdl.handle.net/10419/39102>

Nutzungsbedingungen:

Die ZBW räumt Ihnen als Nutzerin/Nutzer das unentgeltliche, räumlich unbeschränkte und zeitlich auf die Dauer des Schutzrechts beschränkte einfache Recht ein, das ausgewählte Werk im Rahmen der unter

→ <http://www.econstor.eu/dspace/Nutzungsbedingungen>
nachzulesenden vollständigen Nutzungsbedingungen zu vervielfältigen, mit denen die Nutzerin/der Nutzer sich durch die erste Nutzung einverstanden erklärt.

Terms of use:

The ZBW grants you, the user, the non-exclusive right to use the selected work free of charge, territorially unrestricted and within the time limit of the term of the property rights according to the terms specified at

→ <http://www.econstor.eu/dspace/Nutzungsbedingungen>
By the first use of the selected work the user agrees and declares to comply with these terms of use.

**Technologischer Wandel in
AGE-Modellen: Stand der Forschung,
Entwicklungsstand und -potential
des GEM-E3-Modells**

Henrike Koschel und Tobias F. N. Schmidt

Dokumentation Nr. 97-01

Technologischer Wandel in AGE-Modellen: Stand der Forschung, Entwicklungsstand und -potential des GEM-E3-Modells¹

Henrike Koschel und Tobias F. N. Schmidt

Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) Mannheim

Februar 1997

743752

¹ Diese Dokumentation stellt den Teilbeitrag des ZEW zu der im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) durchgeführten Clearing-Studie „Der Einfluß von Energiesteuern und Abgaben zur Reduktion von Treibhausgasen auf Innovation und technischen Fortschritt“ dar.

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einführung**
- 2 Behandlung des technischen Fortschritts in der ökonomischen Theorie**
 - 2.1 Der Begriff des technischen Fortschritts
 - 2.2 Theoretische Ansätze einer Endogenisierung technischen Fortschritts
 - 2.3 Die Rolle von umwelttechnischem Fortschritt in AGE-Modellen
- 3 Verfahrenswahl im Rahmen einer bestehenden Technologie**
- 4 Der Innovationsprozeß in AGE-Modellen: Invention, Diffusion, Adaption**
 - 4.1 Autonomer technischer Fortschritt - der AEEI-Faktor
 - 4.2 Diffusion von neuen Technologien
 - 4.3 Jahrgangskonzepte
 - 4.4 Teilendogenisierung des technischen Fortschritts nach Jorgenson/Wilcoxon
 - 4.5 Der 'latent variable'-Ansatz im WARM-Modell
 - 4.6 Modelle der Kopplung von F&E-Ausgaben und technischem Fortschritt
- 5 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf**

Literatur

Anhang: Das GEM-E3-Modell

1 Einführung

Der Begriff der Innovation sowie des technischen Fortschritts hat in der aktuellen Diskussion um eine nachhaltige Entwicklung und in der Auseinandersetzung mit Fragen der internationalen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands einen zentralen Stellenwert.

Eine erste Durchsicht der Literatur zur ökonomischen Innovationstheorie zeigt allerdings, daß die bisher entwickelten theoretisch-konzeptionellen Ansätze im Bereich des technischen Fortschritts einer adäquaten Behandlung dieses wirtschaftstheoretisch, aber auch wirtschaftspolitisch wichtigen Themas nicht gerecht werden. Die ökonomische Modellierung technischen Fortschritts weist erhebliche Defizite auf, die sich vor allem auch in angewandten allgemeinen Gleichgewichtsmodellen (AGE²) in einer nur mangelhaften Berücksichtigung von Innovationsprozessen, insbesondere im Umweltbereich, widerspiegeln.

Nahezu alle Ansätze zur Berücksichtigung des technologischen Wandels, die in der gängigen AGE-Literatur zu finden sind, beschränken sich auf die Abbildung der Wirkungen des technischen Fortschritts bzw. auf die Modellierung der Diffusion neuer Technologien in den bestehenden Produktionsapparat. Die auf der Mikroebene vorgelagerten Phasen des Innovationsprozesses wie die Invention und Adaption finden dagegen in solchen hochaggregierten gesamtwirtschaftlichen Modellen bisher keine adäquate Berücksichtigung. Gründe hierfür liegen in der analytisch nur schwer formulierbaren stochastischen Natur von Innovationsvorgängen sowie in der mangelnden empirischen Beobachtbarkeit von Innovationsprozessen in der für gesamtwirtschaftliche Analysen notwendigen hohen Aggregation.

Auch wenn die 'Qualität' von einzelwirtschaftlichen bottom-up Studien und Modellen daher im Hinblick auf viele innovationstheoretische Fragestellungen höher einzuschätzen ist als diejenige von gesamtwirtschaftlichen top-down Ansätzen, sind letztere dennoch unverzichtbar im Rahmen der politischen Entscheidungsfindung.

Integrated Assessment-Modelle, welche Ökonomie und Umwelt miteinander verknüpfen, können dabei sowohl die ökologischen als auch die ökonomischen Effekte einzelner umweltpolitischer Maßnahmen (z.B. einer ökologischen Steuerreform) offenlegen und den trade-off zwischen ökologischen und wirtschaftlichen Zielen bewerten. Erst eine solche integrierte Analyse ermöglicht es, ökologisch zielkonforme und ökonomisch tragfähige Lösungen zu finden.

In die Gruppe der Integrated Assessment Modelle gehört auch das GEM-E3 (General Equilibrium Modeling - Economy, Energy, Environment), das in Zusammenarbeit mit anderen europäischen Forschungsinstituten am ZEW im Rahmen eines von der Europäischen Kommission finanzierten Projekts entwickelt wurde³. Die komparativen Vorteile der Anwendung des GEM-E3-Modells in

² Applied General Equilibrium.

³ Die Autoren des Modells sind: Pantelis Capros & Takis Georgakopoulos (NTU-Athens), Stef Proost & Denise Van Regemorter (CES/KU-Leuven), Klaus Conrad & Tobias Schmidt (Universität Mannheim, ZEW-Mannheim), Norbert Ladoux & Marc Veille (CEA/GEMME-Toulouse), Peter McGregor (University of Strathclyde-Glasgow). Finanziert wurde das Projekt von der Kommission der Europäischen Union (DGXII).

der umweltpolitischen Praxis liegen zum einen in seiner europäischen Ausrichtung, zum anderen in seinem interdisziplinären Ansatz. Dabei wird eine Kopplung des am ZEW entwickelten Umweltmoduls an das AGE-Modell vorgenommen, um umwelt- und energiepolitischen Besonderheiten gerecht zu werden. Neben den wirtschaftlichen Auswirkungen umweltpolitischer Maßnahmen kann auch die ökonomisch motivierte Vermeidung der Schadstoffe Schwefeldioxid, Stickoxid und Kohlendioxid simuliert werden.

Im Hinblick auf die Abbildung von technischem Fortschritt weist das GEM-E3-Modell noch Entwicklungspotential auf. In der aktuellen Modellversion ist der technische Fortschritt über einen exogen und autonom stattfindenden Anstieg der Faktorproduktivitäten abgebildet, das heißt, er fällt wie 'Manna vom Himmel' und steht in keinem funktionalen Zusammenhang mit anderen exogenen oder endogenen Modellvariablen, wie z.B. Inputpreisen oder staatlichen Eingriffen in Form von Steuern oder Forschungsförderung.

Die Anpassung der Unternehmen an politisch veränderte Preisstrukturen erfolgt in dem Modell über eine Änderung der Produktions- und Inputeinsatzstrukturen. Fragestellungen, die die Innovationswirkung von umweltpolitischen Instrumenten bzw. die mit diesen verbundenen ökologischen Effekten betreffen, können daher mit diesem Modell in seiner derzeitigen Version nur ansatzweise analysiert werden.

Eine Endogenisierung des technischen Fortschritts könnte daher zur Verbesserung der Aussagefähigkeit des GEM-E3-Modells in diesem Untersuchungsbereich beitragen.

2 Behandlung des technischen Fortschritts in der ökonomischen Theorie

2.1 Der Begriff des technischen Fortschritts

Technischer Fortschritt wird definiert als die „Einführung neuer Technologien im engeren Sinne sowie die intelligenteren Nutzung von akkumuliertem Wissen in Form höherer Qualifikation der Arbeitskräfte und verbesserter Organisation der Produktion (z.B. Arbeitsteilung, Management etc.)“ (ERDMANN 1993:1).

Eine Initialisierung des technischen Fortschritts erfolgt im konkreten Fall durch das Auftreten von Innovationen (Prozeß- oder Produktinnovationen). Während die Innovation im engeren Sinne jedoch nur die Anwendung neuen Wissens ('Erfindung') erfaßt, bezieht sich der Begriff des technischen Fortschritts auf den Innovationsprozeß insgesamt und schließt die einer Innovation vor- und nachgelagerten Phasen der Forschung und Entwicklung (Inventionsphase) oder der Verbreitung der Neuerung (Diffusionsphase) mit ein (FRITSCH 1991:195)⁴.

Die **Inventionsphase** umfaßt die Entstehung von neuem Wissen (Invention). Dieses kann im Rahmen der Grundlagenforschung gewonnen werden oder aber als 'entwicklungsreife Erkenntnis' aus der angewandten Forschung hervorgehen. Inventionen können zum einen zufällig generiert werden oder aber Ergebnis zielgerichteter und geplanter Forschungsaktivitäten sein. Obwohl die Invention nicht auf ihre Realisierbarkeit hin empirisch getestet sein muß, liegt sie gewöhnlich in Form eines technisch brauchbaren Prototyps vor. Somit können durch Inventionen technologischer Wandel ausgelöst und „zukünftig mögliche Techniken konzipiert“ werden (GERYBADZE 1982:27).

Der **Innovationsprozeß** schließt sich an die Inventionsphase an und ist definiert als Zeitraum der Weiterentwicklung und Modifizierung der Invention zu einem wirtschaftlich anwendungsreifen Prototyp. Als Innovation wird nicht nur der Prozeß der erstmaligen Einführung eines neuen Verfahrens, sondern das Verfahren selbst bezeichnet. Nach dem Neuigkeitsgrad einer Innovation unterscheidet man in Basisinnovationen (sog. 'radical innovations') und Verbesserungsinnovationen (sog. 'incremental innovations'). Basisinnovationen beruhen auf der Anwendung neuen technologischen Wissens und stellen Technologiesprünge dar, die häufig mit Produktinnovationen und einem grundlegenden Wandel in der Marktstruktur verbunden sind. Während sich früher die Innovationsforschung weitgehend auf die Untersuchung von Basisinnovationen beschränkt hat, wird in der heutigen Innovationsforschung der kontinuierlichen Entwicklung von kleinen technischen Änderungen im Rahmen von Verbesserungsinnovationen eine ebenso große Bedeutung für den technischen Wandel beigemessen. Verbesserungsinnovationen sind beispielsweise Verfahren, die im Vergleich zu bisherigen eine höhere Energieeffizienz, Produktqualität oder eine geringere Umweltbelastung aufweisen (FREEMAN/PEREZ 1988:45 f.).

⁴ Innovation wird teilweise in der Literatur, so bei DOSI (1988:222), auch in einem weiten Sinn definiert als „search for, and the discovery, experimentation, development, imitation, and adoption of new products, new production processes and new organisational set-ups“.

Wird die Innovation als leistungsfähige Technik anerkannt, kommt es während der **Diffusionsphase** zur Übernahme bei anderen Firmen der Branche. Da der Diffusionsprozeß zur Nutzung von bisher unerschlossenen Entwicklungspotentialen führt, ist er von entscheidender Bedeutung für den technischen Wandel einer Industrie oder Volkswirtschaft (GERYBADZE 1982:5).

Abbildung 1 zeigt eine Einordnung des technischen Fortschritts nach den drei Kriterien: Ursachen, Art der Durchsetzung und Wirkungen (vgl. GABISCH 1992:361 f.).

Abbildung 1: Klassifizierung des technischen Fortschritts (t.F.)

nach seinen Ursachen	autonomer t.F. exogen gegeben (aufgrund spontaner Erfindungen), fällt wie „Manna vom Himmel“	induzierter/endogener t.F. endogen hervorgerufen (aufgrund von Forschung & Entwicklung, Ausbildung, „learning by doing“, preisinduzierter t.F.)
nach der Art seiner Durchsetzung	faktorgebundener t.F. t.F. ändert die Qualität der Produktionsfaktoren im Zeitverlauf; z.B. kapitalgebundener technischer Fortschritt	faktorungebundener t.F. t.F. ändert nicht die Qualität der Produktionsfaktoren, sondern organisatorische Verbesserungen führen beispielsweise zu einem Produktivitätsanstieg aller Produktionsfaktoren, d.h. die technische Fortschrittsfunktion kann von der Produktionsfunktion separiert werden (z.B. Hicks-neutraler t.F.)
nach seiner Wirkung	neutraler / nicht neutraler t.F. die funktionale Einkommensverteilung ändert sich nicht / ändert sich; Hicks-, Solow-, Harrod-Neutralität / Nicht-Neutralität	faktorsparender / -verbrauchender t.F. eine 'fiktive' Ausweitung der Einsatzmenge eines oder mehrer Produktionsfaktoren wird gespart / t.F. verbraucht ein oder mehrere Produktionsfaktoren

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an GABISCH (1992).

Eine erste Durchsicht der Literatur weist darauf hin, daß hinsichtlich der Erklärung von technischem Fortschritt noch erhebliche Forschungslücken bestehen⁵. Bisher wurde der technische Fortschritt in seiner einfachsten Form als autonom modelliert. Die Entwicklung von aufwendigeren Konzepten endogenen technischen Fortschritts im Rahmen der ökonomischen Theorie steckt demgegenüber noch in den Anfängen. Dieses allgemeine und vielfach konstatierte Theoriedefizit läßt sich größtenteils darauf zurückführen, daß die Entstehung technischen Fortschritts individuelle Innovationsentscheidungen voraussetzt, welche ihrerseits von einer Reihe von Faktoren beeinflußt werden und sich daher mit dem traditionellen mikroökonomischen Instrumentarium nur unvollkommen abbilden lassen (vgl. ERDMANN 1993).

⁵ Eine umfassende Übersicht über theoretische Ansätze im Bereich des technischen Fortschritts und wirtschaftlichen Wachstums geben beispielsweise BARRO/SALA-I-MARTIN (1995).

Die Idee einer Endogenisierung des technischen Fortschritts besteht darin, diesen nicht mehr als unerklärbaren, exogen gegebenen Teil des Produktionswachstums zu behandeln, sondern als Resultat bewußt getroffener und mobilisierbarer Innovationsaktivitäten der unternehmerischen Entscheidungsträger abzubilden.

So kann beispielsweise bei preisinduziertem technischen Fortschritt untersucht werden, welchen Einfluß exogene, politisch gesetzte preisliche Anreize auf das Innovationsverhalten der Akteure haben. Es lassen sich diejenigen ökonomischen Instrumente identifizieren, welche über den Preismechanismus den technischen Fortschritt optimal motivieren.

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über die zwei Grundströmungen in der Theorie des technischen Fortschritts gegeben.

2.2 Theoretische Ansätze einer Endogenisierung technischen Fortschritts

Die ökonomische Theorie des technischen Fortschritts ist durch verschiedene Forschungsrichtungen geprägt, welche sich entweder dem (dominanten) Forschungsparadigma der Neoklassik oder dem evolutionsökonomischen Paradigma zuordnen lassen.

Neoklassische Ansätze

Neoklassisch orientierte Ansätze beschäftigen sich vorrangig mit der Analyse der Ursachen und Einflußfaktoren, die für den Produktivitätsfortschritt einer Volkswirtschaft verantwortlich sind. Hierzu gehören (vgl. hierzu und im folgenden ERDMANN 1993)

- Ansätze der Beschreibung und Messung des technischen Fortschritts in der Tradition der von SOLOW (1956) begründeten neoklassischen Wachstumstheorie. Der technische Fortschritt wird in diesen Modellen als nicht erklärbare exogene Restgröße des Wirtschaftswachstums aufgefaßt (autonomer technischer Fortschritt) und über einen Anstieg der Produktivität der Inputfaktoren abgebildet. Hierzu wird die Produktionsfunktion um die zusätzliche exogen gegebene Variable "Zeit" (als Näherungsgröße für den nicht beobachtbaren technischen Fortschritt) ergänzt. Technischer Fortschritt bzw. Produktivitätswachstum drücken sich darin aus, daß die erste Ableitung der Produktionsfunktion nach der Zeit positiv ist (zum autonomen faktorungebundenen technischen Fortschritt siehe auch Kapitel 4.1).
- Untersuchungen der Determinanten von Innovationen unter der Annahme rationaler Kosten-Nutzen-Kalküle auf mikroökonomischer Ebene. Der Übergang auf die Makroebene ermöglicht die Ableitung von Gleichgewichtslösungen, in denen die individuellen Pläne und Erwartungen der Wirtschaftssubjekte miteinander vereinbar sind. Untersucht werden die Wirkungen exogener Impulse auf die individuellen Handlungsrestriktionen und/oder Erwartungen und die Lage der Gleichgewichte.
- Ursache/Wirkungs-Analysen von Innovationsprozessen, welche auf Basis empirischer Untersuchungen objektive Indikatoren zur Innovationsaktivität abzuleiten versuchen.

Hauptproblem solche Modelle ist insbesondere die schwache mikroökonomische Fundierung der empirisch zu testenden Funktionsbeziehungen.

Eine Endogenisierung des Produktivitätswachstums wurde erstmals in den Modellen der „neuen“ Wachstumstheorie vorgenommen (siehe hierzu ROMER 1990, LUCAS 1988, BALDWIN 1996). Dabei kommt dem Phänomen des technischen Fortschritts eine Schlüsselrolle für das langfristige ökonomische Wachstum zu. Ein diesen Modellen zugrundeliegender Kerngedanke besteht darin, daß technischer Wandel und Innovationsprozesse von privaten und öffentlichen Investitionsentscheidungen endogen determiniert werden.

Im Rahmen der neoklassischen Innovationstheorie wurden zahlreiche Modellansätze entwickelt, welche über die Richtung der Innovationsaktivitäten Aufschluß geben sollen (siehe ERDMANN 1993:90 ff.). Angenommen wird dabei, daß sich die Richtung der F&E-Strategien an Marktgegebenheiten, wie z.B. relativen Knappheiten von Produktionsfaktoren oder relativen Faktorkosten/-preisen, orientiert. Nach dieser sogenannten „induced-bias-Hypothese“ würde beispielsweise ein Anstieg der Energiepreise relativ zu den Kapitalnutzungs- und Arbeitskosten zu einer verstärkten Innovationsaktivität in Richtung energiesparender Techniken führen. Daß die „induced-bias-Hypothese“ jedoch, wenn überhaupt, nur einen Teil des Innovationsgeschehens erfassen kann, zeigen empirische Daten über den Zusammenhang von Wachstum des Bruttosozialprodukts und Energiekonsum in den 80er Jahren, wo trotz sinkender relativer Preise eine Entkoppelung zwischen beiden Größen beobachtet werden konnte. Der Preismechanismus ist daher nur eine Determinante unter vielen, welche die Innovationsrichtung und -wirkung lenken (FABER/PROOPS 1990:102 ff.).

Zu den zentralen Annahmen der neoklassischen Innovationsforschung gehören, daß innovationsbezogene Handlungen dem rationalen Kosten-Nutzen-Kalkül unterworfen werden können (Paradigma des homo oeconomicus) und eine eindeutige Funktionsbeziehung zwischen den Input- und Outputgrößen für den Innovationsprozeß besteht. Eine der wesentlichen Grundvoraussetzungen der neoklassischen Innovationstheorie ist daher ein eindeutiger und transparenter Zusammenhang zwischen den Nutzen und Kosten einer Innovation, d.h. vollständige Voraussicht des Entscheidungsträgers. Dies impliziert die Möglichkeit, durch gezielte Manipulationen der Anfangsbedingungen von Systemen deren Entwicklung kontrollieren und vorhersagen zu können.

Die Kritik an der neoklassischen Innovationstheorie setzt an deren äußerst restriktiven Annahmen an. So wird darauf hingewiesen, daß sich Innovationsentscheidungen aufgrund der Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Konsequenzen zumeist dem ökonomischen Rationalwahlmodell bzw. dem neoklassischen Optimierungskalkül entziehen (ERDMANN 1993). Insbesondere Basisinnovationen setzen unternehmerische Entscheidungen voraus, welche sich nicht durch ein streng rationales Kosten-Nutzen-Kalkül abbilden lassen. Eine Formalisierung und Quantifizierung zukunftsöffener und nichtplanbarer Entwicklungen, wie sie Innovationsprozesse darstellen, im Rahmen neoklassischer, deterministischer Modelle stößt prinzipiell auf unüberwindbare Grenzen: „General equilibrium theory can treat invention and sources of novelty only through the introduction of ad hoc assumptions, as has often been conceded“ (FABER/PROOPS 1990:59).

Evolutionsoökonomische Ansätze

Das zunehmende Bewußtsein hinsichtlich der Grenzen der Neoklassik führte zur Entwicklung der evolutorischen Ökonomik, welche, aufbauend auf den Prinzipien der Thermodynamik, der Biologie sowie der mathematischen Theorie komplexer, selbstorganisierender Systeme, die Irreversibilität und Zukunftsoffenheit innovativer Prozesse explizit zu berücksichtigen versucht (siehe z.B. NELSON/WINTER 1982, WITT 1993, ERDMANN 1993). ERDMANN (1993:27) definiert die evolutorische Ökonomik als „Theorie, die sich mit *zukunfts-offenen Entwicklungen im Bereich der Wirtschaft* befaßt“. Als relativ junge Disziplin weist sie jedoch noch kein in sich geschlossenes Theoriegebäude auf. Die bisher entwickelten formalen Modelle erfassen vielmehr nur Teilsaspekte der evolutorischen Ökonomik (z.B. Abbildung der Koordination von Marktprozessen oder von Lern- und Adaptionsprozessen) (FABER/PROOPS 1990:92 f.). ERDMANN (1993:8 ff.) weist in dem Zusammenhang auf die möglichen Vorteile formaler Modelle im Bereich der Innovationsforschung, insbesondere der evolutorischen Ökonomik, hin. Formale Modelle machen erstens - trotz aller Komplexitätsreduktion - Vorstellungen über Handlungskonsequenzen transparent, leicht nachvollziehbar und interpretierbar und ermöglichen Experimente der eigenen Theorie. Zweitens führen sie durch die Nutzung der mathematischen Sprache zur Präzisierung eines theoretischen Zusammenhangs und bieten drittens die Möglichkeit der Modellauswertung in Form von Sensitivitätsanalysen, Prognosen oder Politikempfehlungen.

Die Einbeziehung der Irreversibilität ökonomischer Prozesse im Rahmen des Konzepts der evolutorischen Ökonomik hat nicht zuletzt wichtige ordnungspolitische und strategische Implikationen für eine innovationsorientierte Umweltpolitik und ihren Instrumenteneinsatz. Während in der neoklassischen Gleichgewichtstheorie bei Aufhebung einer umweltpolitischen Maßnahme das System unmittelbar zu seinem umweltbelastenden Ausgangsgleichgewicht zurückkehrt, besteht im evolutorischen Innovationsmodell die Möglichkeit, den Instrumenteneinsatz zeitlich zu befristen. Sobald nämlich irreversible Impulse für die Entwicklung des technischen Fortschritts in Richtung eines gewünschten Forschungs- und Entwicklungs-Paradigmas⁶ gegeben sind, erübrigt sich die weitere Anwendung des umweltpolitischen Instruments. Voraussetzung hierfür ist, daß das Instrument 'evolutionseffizient' ist und gewisse Potentialschwellen zum Übergang auf ein neues Forschungs- und Entwicklungs-Paradigma (bewirkt durch 'sunk costs', Spillover-Effekte, positive Netzwerk-Externalitäten des bisherigen Forschungs- und Entwicklungs-Paradigmas) überwinden vermag. Dann werden die Unternehmen aus wirtschaftlichem Eigeninteresse die umweltpolitisch induzierte Forschungs- und Entwicklungslinie beibehalten (ERDMANN 1993:183 ff.).

Auch wenn seitens einiger Ökonomen ein radikaler Paradigmawechsel in der Innovationstheorie von der neoklassischen Gleichgewichtstheorie zur evolutorischen Ökonomik gefordert wird, lassen sich dennoch gute Argumente gegen eine völlige Ersetzung der neoklassischen

⁶ Unter einem Forschungs- und Entwicklungs-Paradigma kann beispielsweise die Entwicklung von End-of-pipe-Technologien, Inputsubstitutionsprozesse oder auch Wirkungsgradverbesserungen von Energieumwandlungsprozessen verstanden werden (ERDMANN 1993:183).

Gleichgewichtstheorie finden. Die neoklassische Gleichgewichtstheorie (vgl. ERDMANN 1993:5 f., FABER/PROOPS 1990:58)

- zeichnet sich durch ein hohes Maß an Präzision, Stringenz und Konsistenz aus und hat ein unter Ökonomen allgemein anerkanntes sprachliches Instrumentarium geschaffen,
- erlaubt die simultane Lösung des primalen und des dualen Problems des Auffindens von Gleichgewichtsmengen- und preisen in einer dezentralen Marktwirtschaft,
- berücksichtigt explizit die Interdependenzen innerhalb des ökonomischen Systems,
- weist Isomorphien zu evolutionstheoretischen Vorstellungen in anderen Disziplinen wie der Biologie und Ökologie auf („ökologisches Gleichgewicht“),
- hat zahlreiche empirisch bestätigte Aussagen hervorgebracht, die in ein evolutionsökonomisches Konzept übernommen werden könnten.

Ein sinnvoller Ansatzpunkt scheint daher zu sein, die konventionelle neoklassische Theorie gezielt und punktuell mit Elementen des evolutorischen Konzepts (Aspekten der Evolution, Irreversibilität von Zeit) zu bereichern bzw. ergänzen (vgl. FABER/PROOPS 1990, ERDMANN 1993).

Vor dem Hintergrund der obigen Ausführungen läßt sich also festhalten:

Der neoklassische Ansatz weist hinsichtlich der Abbildung von technischem Fortschritt Defizite auf, welche sich in ihrem Grundsatz auch nicht über eine noch so komplex modellierte Endogenisierung des technischen Fortschritts beheben lassen. Diese Defizite liegen vielmehr in der ‘Natur’ der neoklassischen Gleichgewichtstheorie. So läßt sich über stochastische Gleichgewichtsmodelle zwar ‘Risiko’ abbilden, nicht jedoch mit der Zukunftsoffenheit von Innovationsprozessen verbundene Unsicherheiten (FABER/PROOPS 1990:66). Im Rahmen neoklassischer Ansätze erfolgt eine Endogenisierung immer nur insoweit, als daß Innovationen bzw. Innovationsfolgen als Anpassungsprozeß an veränderte Rahmenbedingungen interpretiert werden. Die bisherigen neoklassischen Ansätze einer Endogenisierung des technischen Fortschritt beschränken sich dementsprechend hauptsächlich auf die Abbildung des Zusammenhangs von relativen Preisen für Inputfaktoren und der Innovationswirkung (faktorsparende Rationalisierungen) (KURZ et al. 1989:18). Eine wirklich ‘endogene Innovationskraft’ kann mit dem neoklassischen Instrumentarium jedoch nicht abgebildet werden. Hier müssen die Konzepte der evolutorischen Ökonomik ansetzen.

2.3 Die Rolle von umwelttechnischem Fortschritt in AGE-Modellen

Der Begriff des technischen Fortschritts wurde lange Zeit vor allem im Hinblick auf seine Funktion als Triebkraft für die wirtschaftliche Entwicklung und das Wachstum einer Volkswirtschaft untersucht. Vergleichsweise weniger Bedeutung wurde dagegen dem Faktor ‘Verfügbarkeit von Natur’ für die Evolution wirtschaftlicher Strukturen zuteil. Dementsprechend wurden auch Interdependenzen zwischen der Nutzung neuer Produktionstechniken und des Verbrauchs von knappen Umweltgütern in der ökonomischen Theorie weitgehend ausgeblendet. Erst angesichts des wachsenden Problemdrucks im Umwelt- und Ressourcenbereich konzentriert sich die Innovationsforschung stärker darauf, wie Innovationsprozesse zu einem nachhaltigen

Wirtschaftswachstum beitragen können. Umweltinnovationen in Form von umweltgerechten Techniken, welche Rohstoffe einsparen und/oder das Aufkommen von Emissionen bzw. Abfällen verringern, können in erheblichem Maße zur Entschärfung von absoluten Knappheiten im Umweltbereich beitragen. So resümiert auch der SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (SRU) in seinem jüngst veröffentlichten Umweltgutachten: „Umweltforschung und umwelttechnische Innovationen sind die Grundlage sowohl für weitere Reduzierung der Umweltbelastung als auch für wirtschaftliche Entwicklung“ (SRU 1996: Tz.153).

Ein zentrales Ziel einer Endogenisierung des technischen Fortschritts ist es, der aktuellen ökonomischen bzw. umweltpolitischen Diskussion um die Bedeutung und die Förderungsmöglichkeiten von umwelttechnischem Fortschritt neue Impulse zu geben. Diese Diskussion konzentriert sich derzeit auf die beiden folgenden Fragen:

- Welche Faktoren, z.B. ökonomische Anreize in Form von Umweltafgaben, Subventionen, Zertifikaten oder ordnungsrechtlichen Vorgaben, mobilisieren die innovativen Kräfte der Wirtschaft in der Weise, daß die umwelttechnisch gewünschte Entwicklung vorangetrieben wird?
- Mit welchen kurz- und langfristigen wirtschaftlichen Auswirkungen, z.B. hinsichtlich der internationalen und intersektoralen Wettbewerbsfähigkeit, des Wirtschaftswachstums oder der Beschäftigung, sind verschärfte umweltpolitische Rahmenbedingungen und dadurch ausgelöste Innovationsentscheidungen verbunden?

Zur Beantwortung der ersten Frage, d.h. zur Erklärung von Innovationsprozessen auf mikroökonomischer Ebene, eignen sich gesamtwirtschaftliche top-down Modelle, und so auch AGE-Modelle, weniger. Als Grund hierfür läßt sich anführen, daß sich Innovationsprozesse aufgrund ihrer stochastischen Natur analytisch nur schwer formulieren lassen, weshalb ihre Integration in deterministische Modellansätze nur in begrenztem Umfang möglich ist. Von rein mikroökonomisch orientierten spieltheoretischen Ansätzen könnte in diesem Zusammenhang ein größerer Erklärungsbeitrag zu erwarten sein. Der empirische Aussagegehalt von Spielmodellen ist jedoch äußerst gering, da die Komplexität dieser Ansätze entweder eine sehr hohe Aggregation oder die Beschränkung auf spezielle Einzelfälle erforderlich macht. Eine theoretische Durchdringung des Innovationsverhaltens mit Hilfe von Spielmodellen leistet daher keine quantitative Entscheidungshilfe im Hinblick auf geeignete politische Maßnahmen zur Förderung und Beschleunigung des gesamtwirtschaftlichen Innovationsgeschehens und damit keinen Beitrag zur Beantwortung der zweiten Frage.

Demgegenüber ermöglicht der gesamtwirtschaftliche Ansatz von AGE-Modellen gerade Aussagen über die Auswirkungen alternativer wirtschaftspolitischer Maßnahmen auf einzelne Wirtschaftsbereiche und die gesamte Ökonomie eines Landes. Auf die Bedeutung gesamtwirtschaftlicher Modelle weist auch der SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (SRU 1996: Tz. 154) hin, wenn er fordert, „bei Wahlmöglichkeiten die umweltpolitische Maßnahme mit positiven Nettoeffekten der Beschäftigung zu ergreifen“. Die Art der Modellierung des technischen Fortschritts in solchen gesamtwirtschaftlichen Modellen kann einen entscheidenden Einfluß auf die Modellergebnisse haben. Je nachdem, ob beispielsweise nur Inputsubstitutionsprozesse oder aber auch die Innovation energieeffizienterer Techniken als Reaktion auf eine CO₂-Steuer zugelassen

sind, wird ein Modell höhere oder niedrigere CO₂-Steuersätze zur Erreichung desselben Emissionsreduktionsziels produzieren (vgl. hierzu CONRAD 1993a). Die Einbeziehung des umwelttechnischen Fortschritts in gesamtwirtschaftliche Modelle ist sowohl für die ökologische als auch die wirtschaftliche Bewertung von umweltpolitischen Maßnahmen unverzichtbar. Insbesondere dann, wenn es sich nicht um komparativ-statische, sondern um dynamische Modelle handelt, welche zur langfristigen Analyse ökonomischer Zusammenhänge eingesetzt werden, spielt die Modellierung des umwelttechnischen Fortschritts eine entscheidende Rolle. Auch die Wirkung exogener Eingriffe, z.B. steuerinduzierte Preisänderungen, bzw. der dadurch ausgelöste ökonomische und technische Anpassungs- und Innovationsprozeß lassen sich nur dann adäquat untersuchen, wenn theoretisch und empirisch fundierte Annahmen über den Zusammenhang von umweltpolitischen Maßnahmen und Innovationsverhalten getroffen werden können.

Die Entwicklung einer Theorie des endogenen Fortschritts, welche solche Zusammenhänge abzubilden vermag, ist bisher allerdings noch nicht so weit fortgeschritten, daß sie in die empirischen Anwendungen der Gleichgewichtstheorie integriert werden könnte. Die Modellanwendungen sind daher meistens auf die Darstellung der Wirkungen von technologischem Fortschritt beschränkt. Je nach Untersuchungsschwerpunkt der Modelle versuchen anspruchsvollere Ansätze darüberhinaus die Wirkungsweise des technischen Fortschritts, d.h. also die Diffusion neuer technologisch verbesserter, sektorspezifischer Verfahren, abzubilden.

Als quantitative Entscheidungshilfe für die politischen Entscheidungsträger wurde das GEM-E3 (General Equilibrium Modeling - Economy, Energy, Environment) am ZEW in Zusammenarbeit mit anderen europäischen Forschungsinstituten im Rahmen eines von der Europäischen Kommission finanzierten Projektes entwickelt⁷. Die komparativen Vorteile der Anwendung des GEM-E3-Modells in der umweltpolitischen Praxis liegen zum einen in seiner europäischen Ausrichtung. Damit ist es möglich, über die Wirksamkeit einzelner Instrumententypen hinaus auch die Wirksamkeit europäisch koordinierter und nicht koordinierter Politikstrategien zu evaluieren. Zum anderen zeichnet sich das GEM-E3-Modell durch seinen interdisziplinären Ansatz aus. Durch eine Kopplung des am ZEW entwickelten Umweltmoduls an das AGE-Modell lassen sich neben den wirtschaftlichen Auswirkungen umweltpolitischer Maßnahmen auch die ökonomisch motivierte Vermeidung der Schadstoffe Schwefeldioxid, Stickoxid und Kohlendioxid simulieren.

Im folgenden werden einige Ansätze zur Einbeziehung des technischen Fortschritts in AGE-Modellen dargestellt.

⁷ Eine kurze Beschreibung dieses angewandten allgemeinen Gleichgewichtsmodells wird im Anhang gegeben.

3 Verfahrenswahl im Rahmen einer bestehenden Technologie

Bei konventionellen Produktionsfunktionen mit kontinuierlicher Substitutionalität der Inputfaktoren führt eine Veränderung des Relativpreisgefüges zu einer veränderten Inputstruktur, welche ihrerseits das verwendete Produktionsverfahren repräsentiert. Während die Inputfaktoren Arbeit und sonstige Vorleistungen in diesen Modellen in der Regel als kurz-, mittel- und langfristig variabel angesehen werden, wird der abgeleitete Produktionsfaktor Kapital häufig als kurz- bis mittelfristig inflexibel modelliert, d.h. im einfachsten Fall, daß das Niveau des eingesetzten Kapitalstocks fix, die Einsatzverhältnisse der übrigen Faktoren jedoch im Rahmen der gewählten Substitutionselastizitäten variabel sind.

Eine so spezifizierte Produktionsbeziehung mit quasi-fixem Kapitalstock läßt sich in ihrer dualen Formulierung⁸ durch die variable Kostenfunktion VC beschreiben:

$$VC = VC(X, K, \dot{K}, q, q_L, tf),$$

wobei X die Produktionsmenge, K den quasi-fixen Kapitalstock, \dot{K} die gewünschte Veränderung des Kapitalstocks, q_L den Preis für den Faktor Arbeit, q den Preisvektor der übrigen Vorleistungsinputs und tf den Platzhalter für die Spezifikation des technischen Fortschritts bezeichnen.

Spezifiziert man die Funktion als Cobb-Douglas oder CES-Funktion (mit Substitutionselastizität > 0), so geschieht der Übergang dieses preisinduzierten Wechsels von existierenden Technologievarianten kontinuierlich. Eine explizite technische Formulierung der auf der Isoquanten liegenden Produktionsverfahren ist daher nicht möglich. Lediglich im Basisjahr läßt sich der Zusammenhang zwischen der abstrakten Isoquante und der vorherrschenden Technologien als einzelner Punkt auf der Kurve explizit ausmachen. Die Wahl einer Technologie geschieht rein preisabhängig, d.h. technologische Restriktionen hinsichtlich des Technologiewechsels müssen exogen über die Krümmung der Isoquante vorgegeben werden.

Abbildung 2 stellt diesen Zusammenhang für substitutionale und limitationale Produktionsverhältnisse exemplarisch dar. (x_1^0, x_2^0) bezeichne dabei jeweils das beobachtbare Produktionsverfahren, d.h. die (kostenminimale) Inputzusammensetzung im Basisjahr beim Produktionsniveau Y . Das Faktoreinsatzverhältnis verändert sich im substitutionalen Fall in Abhängigkeit der relativen Preise, d.h. sinkt das Preisverhältnis von $(q_1/q_2)^0$ auf $(q_1/q_2)^1$ - dargestellt im Diagramm durch eine Drehung der Preisgeraden -, ändert sich das optimale Faktoreinsatzbündel von (x_1^0, x_2^0) zu (x_1^1, x_2^1) . In einer limitationalen Spezifikation, wie sie in der Regel bei traditionellen Input-Output-Modellen zu finden ist, bleiben die Faktoreinsatzverhältnisse aufgrund ihrer Invarianz gegenüber dem Relativpreisgefüge konstant.

⁸ Die zur Produktionsfunktion duale Formulierung ist die Kostenfunktion. Beide Formulierungen repräsentieren dasselbe Problem. Die Lösung, d.h. die optimalen Faktoreinsatzmengen, sind daher identisch.

Technischer Fortschritt wird im Rahmen dieser Darstellung jeweils durch eine Verschiebung der Y-Isoquante zum Ursprung hin dargestellt (Pfeil tF).

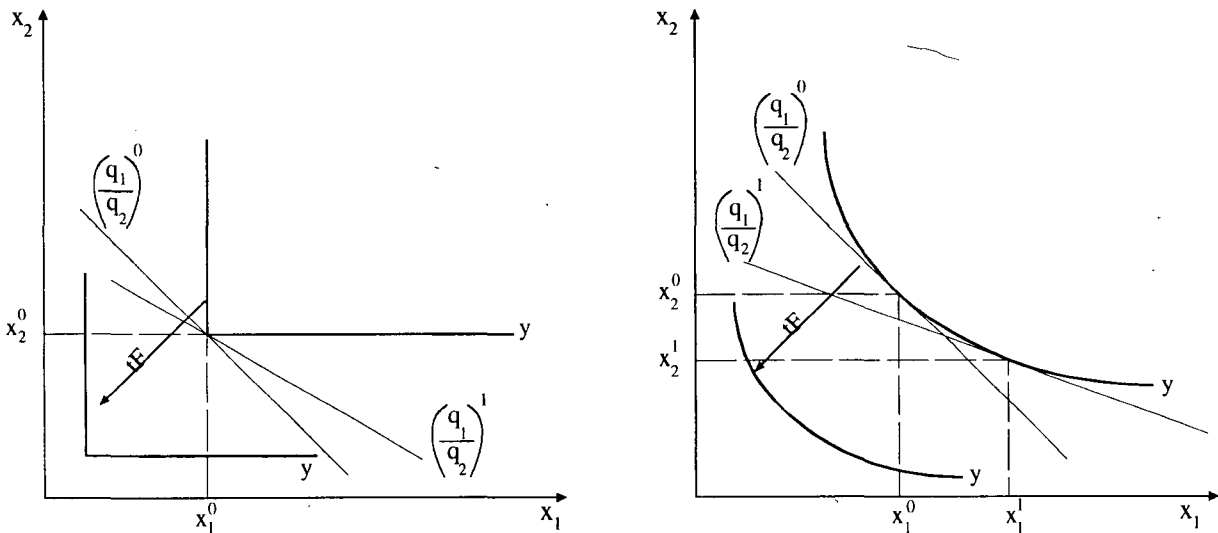


Abbildung 2

Die für die Krümmung der Isoquante verantwortlichen Substitutionselastizitäten werden in der Regel modellexogen geschätzt. Schwierigkeiten bereitet dabei insbesondere die mangelnde empirische Beobachtbarkeit der abstrakten Substitutionselastizitäten. Dieses Problem verstärkt sich mit zunehmendem Aggregationsgrad des Modells. Darüberhinaus ist die Exogenität der Substitutionselastizitäten als Kritikpunkt zu sehen. Flexiblere Funktionsformen (z.B. generalized McFadden) könnten hier Abhilfe schaffen; die Einbeziehung dieser Funktionsformen in AGE-Modelle ist jedoch erheblich komplexer als diejenige von Standardspezifikationen. Auf die Bedeutung flexibler Funktionsformen wird im späteren Verlauf (Kapitel 5: Forschungsbedarf) noch zurückzukommen sein.

Gegenüber den rein limitationalen Produktionsfunktionen der traditionellen Input-Output-Modelle haben substitutionale Produktionsfunktionen jedoch den Vorteil, daß die Auswahl eines Verfahrens aus der Vielzahl der vorherrschenden Technologien endogen in Abhängigkeit der Produktionskostenstruktur (d.h. der Preise für Vorleistungen und Primärfaktoren) ermittelt werden kann. Das in AGE-Modellen angenommene Gewinnmaximierungskalkül der Produzenten führt daher dazu, daß eine durch umweltpolitische Instrumente induzierte Veränderung des Relativpreisgefüges mit einer Veränderung der Produktionsstrukturen einhergeht. In welchem Umfang diese Produktionsverfahren innerhalb eines bestimmten Zeitabschnitts umgestellt werden können, wird von den exogenen Substitutionselastizitäten determiniert. Im GEM-E3 Modell werden, wie übrigens in sehr vielen derzeit eingesetzten AGE-Modellen, CES-Produktionsfunktionen verwendet (vgl. CONRAD/SCHMIDT 1995). Die beiden anderen konventionellen Produktionsfunktionen stellen die Antipoden der möglichen Ausprägungsformen

des weiter gefaßten Konzepts der CES-Funktionen dar (Cobb-Douglas: Substitutionselastizität gegen 1, Leontief: Substitutionselastizität gegen 0).

Unabhängig von der Flexibilität der gewählten Produktionsfunktion beschränkt sich die preisabhängige Verfahrenswahl jedoch auf bereits entwickelte und daher bekannte Technologien. Neue und innovative Technologien finden in diesem einfachen Konzept zunächst keine Berücksichtigung. Die Wirkung und Funktionsweise des technischen Fortschritts läßt sich jedoch durch eine Reihe von mehr oder weniger aufwendigen Ansätzen integrieren.

4 Der Innovationsprozeß in AGE-Modellen: Invention, Diffusion, Adaption

Nahezu alle Ansätze zur Berücksichtigung des technologischen Wandels, die in der gängigen AGE-Literatur zu finden sind, beschränken sich auf die Abbildung der Wirkungen des technischen Fortschritts bzw. - im fortentwickelten Stadium - darüberhinaus auf die Modellierung der Diffusion neuer Technologien in den bestehenden Produktionsapparat. Abgebildet werden also im besten Fall Teilaspekte von Prozessinnovationen, da nur die Phase der Diffusion, nicht jedoch die Phasen Invention und Adaption, berücksichtigt werden. Die Modellierung von Invention und Adaption bedürfte neben einer adäquaten Berücksichtigung von Unsicherheiten einer Vielzahl von Verhaltensinformationen, wie sie in hochaggregierten gesamtwirtschaftlichen Modellen in der Regel nicht zur Verfügung stehen.

Von rein mikroökonomisch orientierten spieltheoretischen Ansätzen ist in diesem Zusammenhang ein größerer Erklärungsbeitrag zu erwarten. Der empirische Aussagegehalt von Spielmodellen ist jedoch beschränkt, da die Komplexität dieser Ansätze entweder eine sehr hohe Aggregation oder die Beschränkung auf spezielle Einzelfälle erforderlich macht. Eine vor allem theoretische Durchdringung des Innovationsverhaltens mit Hilfe von Spielmodellen leistet daher keine quantitativen Entscheidungshilfen im Hinblick auf geeignete politische Maßnahmen zur Förderung und Beschleunigung des gesamtwirtschaftlichen Innovationsgeschehens.

Der gesamtwirtschaftliche Ansatz von AGE-Modellen ermöglicht demgegenüber Aussagen über die Auswirkungen alternativer wirtschaftspolitischer Maßnahmen auf einzelne Wirtschaftsbereiche und die gesamte Ökonomie eines Landes. Die Entwicklung einer Theorie des endogenen Fortschritts ist jedoch noch nicht so weit vorgedrungen, daß sie in die empirischen Anwendungen der Gleichgewichtstheorie integriert werden könnte. Die Modellanwendungen sind daher meistens auf die Darstellung der *Wirkungen* von technologischem Fortschritt beschränkt. Je nach Untersuchungsschwerpunkt der Modelle versuchen anspruchsvollere Ansätze darüberhinaus die *Wirkungsweise* des technischen Fortschritts, d.h. also die Diffusion neuer technologisch verbesserter, sektorspezifischer Verfahren, abzubilden.

Im wesentlichen lassen sich fünf Ansätze in der AGE-Literatur finden. Sie beschreiben dabei zum Teil unterschiedliche Aspekte des technologischen Wandels, weshalb sie häufig in Kombination anzutreffen sind:

- faktorsparender autonomer technischer Fortschritt
- Berücksichtigung von Backstop-Technologien
- Verwendung von Jahrgangskonzepten
- Teilendogenisierung des technischen Fortschritts nach JORGENSEN/WILCOXEN (1993)
- Verwendung eines latenten Strukturmodells nach CARRARO/GALEOTTI (1995) (WARM-Modell)

Während sich der erste Ansatz auf die Erklärung der ökonomischen Auswirkungen des technischen Fortschritts beschränkt, versuchen die vier daran anschließenden Ansätze eine zumindest teilweise Erklärung dafür zu finden, wie technischer Fortschritt stattfindet.

Die Ansätze von Carraro und Jorgenson/Wilcoxon endogenisieren dabei Teilkomponenten des technologischen Wandels. Keiner der obigen Ansätze ist jedoch dazu geeignet, die Entstehung des technischen Fortschritts vollständig modellendogen zu erklären.

Im folgenden werden die fünf Ansätze sowie ein weiterer Ansatz der Kopplung von F&E-Ausgaben und technischem Fortschritt nach COE/HELPMAN (1995) dargestellt.

4.1 Autonomer technischer Fortschritt - der AEEI-Faktor (AEEI: autonomous energy efficiency improvement)

Im einfachsten Fall lassen sich die Wirkungen des technischen Fortschritts durch einen exogenen Parameter in der Produktionsfunktion berücksichtigen. Der Platzhalter tf in der Stückkostenfunktion $vc \left(= \frac{VC}{X} \right)$ erhält dann unter einer CES-Spezifikation folgende Form:

$$vc_i = \sum_j \left(\delta_{i,j} \cdot q_{i,j}^{1-\sigma} \cdot tf_{i,j} \right)^{\frac{1}{1-\sigma}},$$

wobei $tf_{i,j} = e^{-(1-\sigma)tp_{i,j}t}$ und $tp_{i,j}$ die exogen gesetzte Rate des preismindernden bzw. faktorvermehrenden technischen Fortschritts von Input j in Sektor i ist. Der Parameter t indiziert die Zeit.

Sind die $tp_{i,j}$ für alle Faktorinputs j gleich, spricht man von faktorungebundenem technischen Fortschritt, da sich die Fortschrittsfunktion von der Produktionsfunktion separieren läßt. Bei konstanter Kapitalintensität bleibt das Verhältnis der Grenzproduktivitäten der Faktoren bei dieser Fortschrittsfunktion unverändert, sie impliziert Hicks-neutralen technischen Fortschritt. Werden die $tp_{i,j}$ factorspezifisch differenziert, spricht man von faktorgebundenem technischen Fortschritt. Neutralität ist nicht mehr gewährleistet, da unterschiedliche Raten die funktionale Einkommensverteilung verändern.

Für energie- und umweltpolitische Fragestellungen ist insbesondere die Entwicklung des technischen Fortschritts in der Verwendung von Endenergie von Bedeutung (AEEI). Die Interpretation des AEEI-Faktors geht über die Definition des 'reinen' technischen Fortschritts hinaus. Er integriert alle nicht preisinduzierten Veränderungen der Energieintensität und repräsentiert daher die Effizienzwirkung von technologischen und strukturellen Entwicklungen (Veränderungen in der Struktur der ökonomischen Aktivität) ebenso wie die von nicht-preisorientierten politischen Vorgaben (z.B. Selbstverpflichtungen etc.) (vgl. GRUBB et al.

1993:455). Der Wahl dieses Parameters kommt im Hinblick auf die Modellergebnisse eine entscheidende Bedeutung zu.⁹

Die Einfachheit des Konzepts hat dazu geführt, daß es in einer Vielzahl von AGE-Ansätzen wiederzufinden ist. Beispiele hierfür sind das Modell von MANNE et al. (1995) (Global 2100, MERGE), das OECD-Modell GREEN, die gegenwärtige Version von GEM-E3, oder die Modelle der Conrad-Gruppe (CONRAD/SCHRÖDER 1991, HENSELER-UNGER 1985).

4.2 Diffusion von neuen Technologien

Eine Reihe von vor allem energiewirtschaftlich orientierten AGE-Modellen berücksichtigt eine modellexogen gesteuerte Penetration von neuen, d.h. bekannten aber bisher nicht eingesetzten Technologien. Im GREEN Model (vgl. MENSBRUGGHE 1994) werden letztere als heute bereits bekannte, aber erst in Zukunft kommerziell verfügbare Technologieoptionen definiert. Die Einführung dieser Technologien wird sowohl vom Zeitpunkt ihrer Marktreife (Penetration wird exogen vorgegeben) als auch von ihren Produktionskosten relativ zu den übrigen Technologien bestimmt. Backstopgüter werden häufig nur in Form einer unbegrenzten Inputquelle bei exogen vorgegebenem Bezugspreis modelliert. Eine genaue Kenntnis der Technologien ist daher nicht notwendig. In GREEN werden beispielsweise pro Energieträger (Kohle, Öl, Gas) zwei Backstop-Technologien (kohlenstoffhaltig, kohlenstofffrei) sowie eine 'elektrische' Backstop-Option unterschieden. Im MERGE Model von MANNE et al. (1995) werden bei der Bereitstellung von Elektrizität vier, beim nicht-elektrischen Energieangebot neun neue Technologien unterschieden. Unbegrenzt verfügbar im Sinne einer Backstop-Technologie ist dabei nur eine der nicht-elektrischen Technologien.

4.3 Jahrgangskonzepte

In Erkenntnis über die faktorgebundene Natur des technischen Fortschritts entwickelte SOLOW (1959) das Konzept des effektiven Kapitals, welches sowohl jahrgangsgebundenen als auch -ungebundenen (Hicks-neutralen) technischen Fortschritt zuläßt. Als effektives Kapital bezeichnet Solow dabei ein nach Produktivitätswachstum differenziertes Aggregat von Kapitaljahrgängen. Die Differenzierung der technologisch unterschiedlichen Produktionsverfahren wird nach dem Installationsalter vorgenommen. Neuanschaffungen wird in der Regel eine höhere Anpassungsfähigkeit attestiert als älteren, bereits vor Jahren installierten Produktionskapazitäten. Die Unterscheidung zwischen verschiedenen Technologien kann sich auf die Funktionsform (z.B. CES für neue Jahrgänge, Leontief für ältere), die Inputstruktur (z.B. andere Verteilungsparameter in CES) oder die Flexibilität (unterschiedliche Substitutionselastizitäten in CES) der Produktionsfunktion beziehen. CONRAD/HENSELER-UNGER (1986) nehmen beispielsweise für die Spezifikation ihrer Nichtenergiesektoren gleiche Funktionsformen (CES) und Substitutionselastizitäten an und differenzieren die Jahrgänge nach dem Verteilungsparameter. In

⁹ GRUBB et al. (1993) und DEAN/HOELLER (1992) zeigen die Bedeutung des AEEI-Parameters in einem Vergleich verschiedener Modelle und deren Ergebnisse auf.

GREEN dagegen werden die Jahrgänge nach Substitutionselastizitäten differenziert. Älteren Jahrgängen werden geringere Inputsubstitutionsmöglichkeiten zugestanden als neueren.

Häufig werden nur zwei Jahrgänge (alt und neu) explizit unterschieden (z.B. GREEN, Modell von Conrad/Henseler-Unger). Während der neue Kapitalstock einer Periode t von den Investitionsentscheidungen dieser Periode bestimmt wird, ergibt sich der alte Kapitalstock der gegenwärtigen Periode aus dem Aggregat des alten Kapitalstocks der Vorperiode abzüglich dessen Abschreibungen und dem neuen Kapitalstock der Vorperiode. Die einzelnen Jahrgänge werden zwar separat angeschafft, jedoch nicht separat bis zu ihrer vollständigen Abschreibung berücksichtigt. Ein in Periode t angeschaffter Jahrgang wird in Periode $t+1$ dem alten Stock zugeschlagen. Wird beispielsweise eine CES-Spezifikation für die vier Aggregate Kapital, Arbeit, Energie und Material (KLEM) vorgegeben und darüberhinaus angenommen, daß sich die beiden Technologien zwar hinsichtlich der Verteilungsparameter, nicht jedoch hinsichtlich ihrer Substitutionsmöglichkeiten unterscheiden, so wird der preisabhängige Inputkoeffizient E/X für das Energieaggregat durch folgende Funktion erklärt.¹⁰

$$\frac{E_{t+1}}{X_{t+1}} = \frac{1}{1+g} \left[(1-\delta) \cdot d_{E,t}^a \cdot \left(\frac{PE_{t+1}}{PX_{t+1}} \right)^{-\sigma} + (g+\delta) \cdot d_{E,t}^n \cdot \left(\frac{PE_t^n}{PX_{t+1}} \right)^{-\sigma} \right]$$

Dabei bezeichnet g die Wachstumsrate, δ die Abschreibungsrate, X_t den Output des Sektors, PX_t den Preis desselben¹¹, E_t den Energieeinsatz, PE_t und PE_t^n die zum jeweiligen Jahrgang gehörigen Preise des Energieaggregats. Nimmt man nun an, daß der Preis für das Energieaggregat von alter und neuer Technologie gleich ist¹², läßt sich der Verteilungsparameter für das Energieaggregat weiter vereinfachen.

$$d_{E,t+1}^a = \frac{1}{1+g} \left((1-\delta) \cdot d_{E,t}^a + (g+\delta) \cdot d_{E,t}^n \right)$$

Der wesentliche Vorteil dieser Spezifikation liegt nun darin, daß sie sowohl die Preisabhängigkeit der Inputkoeffizienten abbildet als auch ihre technologische Differenzierung ermöglicht. Eine genaue Identifizierung der einzelnen Technologien im Technologiemix eines Sektors ist jedoch nicht notwendig.

Existiert hingegen detailliertere Information über die technischen Eigenschaften der einzelnen Produktionsverfahren, läßt sich der sektorspezifische Inputkoeffizient als einfaches gewichtetes Mittel der Inputkoeffizienten der jeweiligen Jahrgänge ermitteln.¹³ Diese Information liegt jedoch in hochaggregierten gesamtwirtschaftlichen Modellen in der Regel nicht vor.

¹⁰ Diese Spezifikation entspricht dem Ansatz von HENSELER-UNGER (1985).

¹¹ Bei vollständiger Konkurrenz erzielen alle Technologien den gleichen Preis, so daß keine Technologie vollständig von den anderen verdrängt wird.

¹² Das heißt, es wird keine weitere technologische Differenzierung in den Aggregatskomponenten vorgenommen.

¹³ Dieser Ansatz wird häufig in Input-Output-Modellen (Leontief-Technologie) verwendet.

4.4 Teilendogenisierung des technischen Fortschritts nach Jorgenson/Wilcoxon

Eine preisabhängige Endogenisierung des faktorgebundenen Fortschrittskonzeptes in AGE-Modellen ist in den Modellen der Jorgenson-Gruppe für die US-amerikanische Wirtschaft zu finden.¹⁴ Die Produktion wird in diesen Modellen in dualer Formulierung als Translog-Stückkostenfunktion spezifiziert.

$$\ln c = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \ln q_i + \alpha_T g(t) + \frac{1}{2} \sum_{i,j} (\beta_{i,j} \ln q_i \ln q_j) + \sum_i (\gamma_{iT} \ln q_i g(t)) + \frac{1}{2} \gamma_{TT} g(t)^2$$

Die (wertmäßigen) Anteile der Inputs können - mit Shephard's Lemma - abgeleitet werden.

$$v_i = \alpha_i + \sum_j \beta_{i,j} \ln q_j + \gamma_{iT} g(t)$$

Die Ableitung der Kostenfunktion nach der Zeit verdeutlicht die einzelnen Wachstumskomponenten des technischen Fortschritts.

$$\frac{\partial \ln c}{\partial t} = \left(\alpha_T + \sum_i \gamma_{iT} \ln q_i + \gamma_{TT} g(t) \right) \cdot g(t)$$

Die Parameter α_T und γ_{TT} sind exogen und repräsentieren die neutrale Komponente des technischen Fortschritts. Die Endogenisierung des Produktivitätsfortschritts wird in diesem System durch die preisinduzierte Komponente des technischen Fortschritts $\gamma_{iT} \ln q_i$ erreicht. Technischer Fortschritt fällt in diesem System nicht wie 'Manna vom Himmel', sondern ist input- bzw. faktorverbrauchend bzw. -sparend. Die Parameter γ_{iT} werden dabei als 'biased productivity growth' bezeichnet. Sie bestimmen den Einfluß der Inputanteile auf den Produktivitätsfortschritt (preisinduzierter technischer Fortschritt). Dabei signalisiert das Vorzeichen von γ_{iT} , ob der technische Fortschritt in einer Industrie hinsichtlich der jeweiligen Vorleistungskomponenten sparend ($\gamma_{iT} < 0$) oder verbrauchend ($\gamma_{iT} > 0$) wirkt.

Die Wachstumsrate $g(t)$ wird als logistische Funktion beschrieben.

$$g(t) = \frac{1}{1 + e^{-\mu(t-\tau)}}$$

Die beiden Parameter μ und τ werden sektorspezifisch aus historischen Daten geschätzt. Dies impliziert in der Regel unterschiedliche Wachstumsraten der Sektoren. Bei unendlichem Produktivitätswachstum und unterschiedlichen Wachstumsraten besteht in einer Langfristanalyse jedoch die Möglichkeit, daß der Sektor mit der höchsten Wachstumsrate alle anderen Produktionsbereiche verdrängt. Die Abbildung eines ausgeglichenen gleichgewichtigen Wachstumspfad erfordert daher identische Wachstumsraten für alle Sektoren oder ihre

¹⁴ Als Literatur hierzu siehe: JORGENSON/WILCOXEN (1993) und WILCOXEN (1988).

Begrenzung. Die obige Spezifikation konvergiert für t gegen unendlich gegen einen festen Wert, so daß das Produktivitätswachstum nach oben hin begrenzt ist ($\dot{g}(t) = 0$ für $t \rightarrow \infty$).

Jorgenson/Wilcoxon weisen darauf hin, daß ihr Ansatz ein Auftreten negativer Kostenanteile (bei langfristigem Untersuchungshorizont und relativ hohen Wachstumsraten) nicht vollständig ausschließt. Sie stellen jedoch fest, daß in den bisherigen empirischen Anwendungen des Modells diese Problematik nicht aufgetreten ist (vgl. WILCOXEN 1988).

Wenngleich der Ansatz der Jorgenson-Gruppe aufgrund der Preisabhängigkeit des technischen Fortschritts eine wesentliche Verbesserung gegenüber herkömmlichen Ansätzen darstellt, kann auch er das Kernproblem der Endogenisierung des technischen Fortschritts nicht lösen. Die Notwendigkeit einer exogenen Vorgabe tritt in diesem Ansatz lediglich eine Stufe später auf, da die Trends im Einsatz der verschiedenen Inputs ('biased productivity growth', γ_{it}) im Zeitablauf unverändert bzw. exogen bleiben (vgl. PETERS 1995). Weder Höhe noch Richtung des Parameters γ_{it} verändern sich mit dem Preis des entsprechenden Inputs. Unabhängig vom Preis wird ein bestimmter Inputfaktor vom technischen Fortschritt entweder verbraucht ($\gamma_{it} > 0$) oder gespart ($\gamma_{it} < 0$).

In ihrer Schätzung der Parameter γ_{it} für die US-amerikanische Wirtschaft stellen Jorgenson/Wilcoxon für drei der 35 in ihrem Modell abgebildeten Sektoren einen energiesparenden Einfluß des technischen Fortschritts fest (vgl. WILCOXEN 1988:165). Dies betrifft Erz- und Kohlebergbau sowie Raffinerien. In allen übrigen Sektoren wirkt der technische Fortschritt zwar arbeits-, material oder kapitalsparend, die Energieeffizienz geht jedoch zurück. Eine CO₂- und/oder Energiesteuer wirkt in diesem Konzept daher doppelt negativ. Zum einen wird Energie relativ zu den übrigen Inputs teurer. Die Unternehmen müssen von der Minimalkostenkombination abweichen und zu höheren Kosten produzieren. Dies führt unter sonst gleichbleibenden Bedingungen zu einem Produktionsrückgang. Darüber hinaus steigt der durch technischen Fortschritt induzierte Energieverbrauch, da γ_{ET} für die meisten Sektoren größer Null ist. Der technische Fortschritt führt daher zu einem weiteren Produktivitätsrückgang. Ob sich das Vorzeichen des Parameters bei einer Schätzung mit bundesdeutschem Datenmaterial umkehren würde, erscheint fraglich. In der Vergangenheit dürfte der technische Fortschritt auch hier Arbeit oder Materialinputs durch Energie substituiert haben.

4.5 Der 'latent variable'-Ansatz im WARM-Modell

Der 'latent variable' Ansatz des WARM-Modells¹⁵ baut auf einem Jahrgangskonzept, bestehend aus einem energiesparenden, umweltfreundlichen Teil (K_e) und einem energieverbrauchenden, emissionsintensiven Teil (K_p) des Kapitalstocks auf. Der gesamte Kapitalstock wird als Summe der beiden Qualitäten definiert ($K_t = K_p + K_e$).

¹⁵ Vgl. zu den folgenden Ausführungen CARRARO/GALEOTTI (1995).

Für die drei Wachstumsraten der so definierten Kapitalstöcke impliziert dies den folgenden Zusammenhang.

$$g_t = g_p + (g_e - g_p) \left(\frac{K_e}{K_t} \right)$$

Die Differenz der beiden Wachstumsraten wird nun in Abhängigkeit einer langfristigen Wachstumsrate des Kapitals $f(x)$ bei vollständiger Ausschöpfung der Energiesparmaßnahmen (d.h. $K_t = K_e$ und $g_p = 0$) – sowie der gegenwärtig vorherrschenden Relation von umweltfreundlichem Kapitalstock zu gesamtem Kapitalstock definiert. Der Parameter ε repräsentiert stochastische Fehler.

$$g_e - g_p = \frac{f(x)}{K_e/K_t} + \varepsilon$$

Die (langfristige) Wachstumsrate des Kapitals $f(x)$ wird ökonometrisch geschätzt und bleibt für das Modell exogen. Die Spezifikation des technischen Fortschritts in WARM gibt daher kein Erklärungsmodell für die langfristige Entwicklung des technischen Fortschritts ab.

Kurz- und mittelfristig impliziert die obige Formel, daß das Wachstum von energiesparendem Kapital mit zunehmender Ausschöpfung des Einsparpotentials sinkt. Die Entwicklung des emissionsintensiven Kapitalstocks wird ebenfalls in Abhängigkeit von einer Reihe von Variablen ökonometrisch geschätzt. Zu den erklärenden Variablen gehören neben dem Produktionsniveau und den Faktorpreisen insbesondere die Ausgaben für Forschung und Entwicklung. Letztere werden modellendogen in Abhängigkeit von der Gesamtnachfrage, der relativen Faktorpreise und einer Reihe von relevanten Politikvariablen, wie z.B. ökologisch orientierten Steuern oder staatliche Innovationsförderprogrammen (Subventionen), bestimmt.

Die obigen Gleichungen definieren zusammen mit den Modellgleichungen für F&E-Ausgaben, Faktorpreise und Gesamtnachfrage die Struktur des Latenten-Variablen-Modells.

Die ökonometrische Schätzung der empirisch nicht beobachtbaren Wachstumsraten g_e und g_p wird über eine Reihe von Schätzfiltern vorgenommen (vgl. CARRARO/GALEOTTI 1994). Als Ergebnis erhalten die Autoren des Modells Zeitreihen für die beiden Kapitalstöcke K_e und K_p . Der Quotient T der beiden Größen stellt nun einen Indikator für den technischen Fortschritt bezüglich der 'Umweltverträglichkeit' des Kapitalstocks dar.

$$T = \frac{K_e}{K_p}$$

Das durchschnittliche Wachstum dieses Indikators variiert empirisch in Abhängigkeit des Entwicklungsstandes eines Sektors oder Landes. Für die EU-Länder stellen die Autoren Wachstumsraten dieses Indikators zwischen 2% (Deutschland, Frankreich und Italien) und 30% (Griechenland) fest. Mit zunehmendem Entwicklungsstand nimmt der Zuwachs des Indikators jedoch ab.

Die Formulierung des Zusammenhangs von technischem Fortschritt und modellendogenen F&E-Ausgaben macht den Ansatz von Carraro insbesondere für die Abschätzung der Innovationswirkungen von umweltpolitischen Maßnahmen interessant. Für einen Einsatz in stärker disaggregierten Modellen ist zu prüfen, ob das für die ökonometrische Schätzung erforderliche Datenmaterial vorhanden ist.

4.6 Modelle der Kopplung von F&E-Ausgaben und technischem Fortschritt

Ein weiterer, bisher allerdings noch nicht in einem AGE-Modell angewandter Ansatz der Teilendogenisierung des technischen Fortschritts besteht in einer Kopplung von F&E-Ausgaben und Produktivitätsänderungen. Die Modellierung dieses Zusammenhangs erweist sich jedoch als äußerst kompliziert, da beispielsweise nur ein kleiner Teil der wissenschaftlichen und industriellen Forschung überhaupt zu technischen Innovationen führt, time-lags zwischen dem Zeitpunkt der F&E-Ausgaben und dem Zeitpunkt der induzierten Innovation auftreten können und (positive) Externalitäten (Spillover-Effekte aufgrund des „öffentlichen Gut“-Charakters von F&E-Ausgaben) infolge der Verbreitung neuen Wissens zu berücksichtigen sind (PERELMAN 1995:349 ff.).

Einen entsprechenden Ansatz haben COE/HELPMAN (1995) entwickelt. Mit Hilfe von empirischen Schätzungen des langfristigen Zusammenhangs von kumulierten F&E-Ausgaben und der Entwicklung der totalen Faktorproduktivität (*TFP*) einer Volkswirtschaft versuchen die Autoren das Solow'sche Residuum auf die Akkumulation von Wissen zurückzuführen. Die kumulierten F&E-Ausgaben werden dabei als 'Näherungsgröße' für den Wissensstock einer Volkswirtschaft interpretiert.

Ein spezieller Vorzug dieses Ansatzes, insbesondere für Modelle mit internationalen Handelsbeziehungen wie das GEM-E3-Modell, besteht darin, daß Spillover-Effekte von ausländischen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf die inländische Produktivität erfaßt werden können. Solche Spillovers werden durch den internationalen Handel mit Gütern übertragen: Durch den Einsatz von im Ausland hergestellten Vorleistungsgütern kann ein Land seinen eigenen Wissensstock vergrößern. In dem theoretischen Modell von Coe und Helpman wird der Wissensstock des Inlandes aus den kumulierten heimischen F&E-Ausgaben, der Wissensstock des Auslandes aus der mit den Importanteilen gewichteten Summe der kumulierten F&E-Ausgaben der ausländischen Handelspartner gebildet.

Die totale Faktorproduktivität *TFP* wird in herkömmlicher Weise definiert als:

$$\log TFP = \log y - \beta \log K - (1 - \beta) \log L$$

wobei β den Einkommensanteil des Produktionsfaktors Kapital am Bruttosozialprodukt darstellt (die Konstanz von β impliziert eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion).

In der empirischen Schätzgleichung für die *TFP* wird die Änderung der *TFP* eines Landes *i* als Funktion der Änderung des inländischen F&E-Ausgabenstocks S^d und des ausländischen F&E-Ausgabenstocks S^f dargestellt:

$$\log TFP_i = a_i^0 + a_i^d \log S_i^d + a_i^f m_i \log S_i^f$$

wobei m_i den Importanteil des Landes i am Bruttosozialprodukt des Landes i symbolisiert, das heißt, je mehr ein Land importiert bzw. je größer der Wert von m_i ist, desto stärker profitiert es von den ausländischen F&E-Aktivitäten. a_i^d stellt die Elastizität von TFP bezüglich der heimischen F&E-Ausgaben dar, $a_i^f m_i$ die Elastizität von TFP bezüglich der ausländischen F&E-Ausgaben.

Auf Basis der für den Zeitraum 1971-1990 für 21 OECD-Länder plus Israel (einschließlich der 15 EU-Mitgliedsstaaten) berechneten TFP -Werte sowie des inländischen und des ausländischen F&E-Ausgabenstocks werden die Parameterwerte (Elastizitäten) geschätzt.

Inwieweit der Ansatz von Coe und Helpman als Basis für die Entwicklung eines Konzepts des endogenen umwelttechnischen Fortschritts geeignet ist, muß einer eingehenderen Untersuchung vorbehalten bleiben.

Zur Abbildung von umwelttechnischem Fortschritt in der Nutzung fossiler Energieträger müßte zunächst der Komplex TFP wenigstens in die zwei Komponenten 'Produktivität fossiler Energieträger' und 'Produktivität aller anderen Inputfaktoren' zerlegt werden.

Um preisinduzierten technischen Fortschritt modellieren zu können, sind zudem Informationen über den Zusammenhang von Forschungs- und Entwicklungsausgaben und Inputpreisen notwendig. Hier setzen zahlreiche neoklassisch orientierte Modellansätze an, die die Reaktion der relativen Ausgaben für Forschung und Entwicklung im Gleichgewicht auf eine Variation der relativen Verknappung der Produktionsfaktoren bzw. der relativen Faktorkosten abbilden (siehe ERDMANN 1993:69 ff.). Als beispielhafter Ansatz sei das Grundmodell von DASGUPTA/STIGLITZ (1980) erwähnt, in dem jeder Produzent auf einem oligopolistischen Markt seine F&E-Ausgaben nach der Cournot'schen Verhaltensannahme festlegt. Als Ergebnis erhält man eine positive Beziehung zwischen F&E-Ausgaben pro Unternehmen und dem Preis/Kostenverhältnis auf dem Markt.

5 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Die Berücksichtigung von Innovationsprozessen und technischem Fortschritt in ökonomischen Modellen ist immer noch als mehr oder weniger unvollkommen zu bezeichnen.

Die Modellierung von Invention, Diffusion und Adaption einer Technologie erweist sich insbesondere in top-down Modellen als nahezu unlösbares Unterfangen. Die stochastische Natur von Innovationsprozessen ist analytisch nur schwer formulierbar, weshalb ihre Integration in deterministische Modellansätze nur in sehr begrenztem Umfang möglich ist. Ein weiteres Problem ist die mangelnde empirische Beobachtbarkeit von Innovationsprozessen in der für gesamtwirtschaftliche Analysen notwendigen hohen Aggregation. Die Qualität einzelwirtschaftlicher bottom-up Studien und Modelle ist daher in jedem Fall höher einzuschätzen als diejenigen von gesamtwirtschaftlichen top-down Ansätzen. Zudem zeigen die grundlegenden Schwierigkeiten der neoklassischen Theorie hinsichtlich der Erklärung des technischen Fortschritts sowie der bisherige Mangel an empirischen und theoretischen Studien zur Endogenisierung des technischen Fortschritts die derzeitigen Grenzen möglicher Endogenisierungsvorschläge von technischem Fortschritt in AGE-Modellen auf.

Im Hinblick auf die Bedeutung gesamtwirtschaftlicher Integrated Assessment-Modelle für die umweltpolitische Entscheidungsfindung darf die Rolle des umwelttechnischen Fortschritts in ökonomischen Modellen jedoch nicht unterschätzt werden. Insbesondere zur Auswahl effizienter umweltpolitischer Instrumente und der Bewertung ihrer innovativen Wirkung sind gesamtwirtschaftliche Modelle als Entscheidungsgrundlage unverzichtbar. Deren Aussagefähigkeit könnte durch eine verbesserte Spezifikation des technischen Fortschritts entscheidend erhöht werden.

Zur Schließung dieser Forschungslücke sollten zukünftige Forschungsaktivitäten verstärkt auf die Entwicklung von Konzepten eines endogenen technischen Fortschritts gerichtet werden.

Darüber, welches Konzept des technischen Fortschritts als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer konkreten GEM-E3-Spezifikation zugrundegelegt werden sollte, läßt sich derzeit noch keine gut begründbare, definitive Aussage treffen. Diese Frage läßt sich in angemessener Weise erst nach einer ausführlichen Beschäftigung mit der Theorie des technischen Fortschritts, des endogenen Wachstums und der ökonomischen Innovationstheorie beantworten. Im Hinblick auf eine mögliche Neuorientierung der neoklassischen Theorie erscheint in dem Zusammenhang auch eine intensivere Auseinandersetzung mit der Theorie der evolutorischen Ökonomik als vielversprechend.

Auf Basis des derzeitigen Forschungsstandes kann eine Spezifizierung methodisch über zwei Wege erfolgen:

1. über die Integration einer neu spezifizierten, endogenisierten technischen Fortschrittsfunktion in die ursprüngliche CES-Produktionsfunktion des GEM-E3-Modells, deren Parameter mittels ökonometrischer Schätzungen auf der Basis empirischer und mikroökonomisch innovationstheoretisch fundierter Ergebnisse gewonnen werden. Ein Ansatz hierfür wäre

beispielsweise die Weiterentwicklung der Modelle von Coe/Helpman oder von Carraro/Galeotti im Hinblick auf umwelttechnischen Fortschritt. Die Struktur der CES-Funktion bleibt damit im Prinzip unangetastet. Die Endogenisierung erfolgt beispielsweise über die Einführung einer preis- oder F&E-abhängigen technischen Fortschrittsfunktion.

2. über die Änderung der CES-Produktions- bzw. Kostenfunktion zugunsten flexiblerer funktionaler Formen, welche den zu beschreibenden Produktionsbeziehungen *a priori* keine Restriktionen, z.B. in Form konstanter Substitutionselastizitäten, auferlegen (siehe PETERS 1995). Die am häufigsten angewandte flexible funktionale Form zur Schätzung von Kostenfunktionen ist die von CHRISTENSEN et al. (1973) entwickelte Translog-Kostenfunktion¹⁶. Die Flexibilität der Translog-Funktion besteht darin, daß diese eine lokale Approximation zweiter Ordnung des 'Randes' einer beliebigen Produktionsmöglichkeitenmenge vornimmt und damit eine größere Variationsbreite der Substitutions- und Transformationsstrukturen ermöglicht. Ein Nachteil des Translog-Ansatzes im Rahmen der Anwendung von allgemeinen Gleichgewichtsmodellen besteht darin, daß die geschätzte Kostenfunktion nicht notwendig global konkav in den Inputpreisen und daher nicht 'well-behaved' im neoklassischen Sinn ist (KUMBHAKAR 1994). DIEWERT/WALES (1987) entwickelten daraufhin, u.a. auf Basis der 'symmetric generalized McFadden' (SGM), weitere flexible funktionale Formen zur Schätzung von Kostenfunktionen, denen die Bedingung der globalen Konkavität auferlegt werden kann, ohne daß damit wesentliche Flexibilitätseigenschaften zerstört würden. Im Zusammenhang mit technischem Fortschritt sind flexible Funktionsformen interessant, da sie 'willkürlich auftretenden' technischen Fortschritt abbilden können.

Bei der Auswahl eines geeigneten theoretischen Modells für die empirische Anwendung ist darauf zu achten, daß die Spezifikation des technischen Fortschritts selbst so einfach wie möglich gehalten werden sollte. So sind AGE-Modelle vorrangig zur Analyse gesamtwirtschaftlicher Auswirkungen wirtschafts- und umweltpolitischer Maßnahmen und nicht zur realitätsnahen Abbildung des Innovationsverhaltens einzelner Sektoren entwickelt worden. Um Aufschluß über die Innovationswirkungen einzelner politischer Maßnahmen auf der Mikroebene zu erhalten, sind daher empirische Untersuchungen und mikroökonomisch fundierte Innovationsmodelle notwendig. Darüber hinaus muß überprüft werden, ob die für die Implementation einer Spezifikation erforderlichen Daten überhaupt bzw. im notwendigen Disaggregationsgrad (z.B. sektorspezifisch) verfügbar sind. Hierbei kann auf amtliche Statistiken (EUROSTAT, Statistisches Bundesamt),

¹⁶ Die Translog-Kostenfunktion wurde auch dem im Kapitel 4.4 vorgestellten Modell von JORGENSON/WILCOXEN (1993) zugrundegelegt. Neben der Translog-Kostenfunktion findet noch die von DIEWERT (1971) eingeführte 'Generalized Leontief' Kostenfunktion häufig Anwendung.

empirische Studien sowie auch auf die Auswertungen von Befragungen, z.B. des am ZEW durchgeführten Mannheimer Innovationspanels (MIP), zurückgegriffen werden.

Literatur

- BALDWIN, R. (1996): „The Economics of Technological Progress and Endogenous Growth in Open Economies“. In: Koopmann, G. / Scharrer, H.-E. (eds.) *The Economics of High-Technology Competition and Cooperation in Global Markets*. Baden-Baden, S. 63-75.
- BARRO, R.J. / SALA-I-MARTIN, X. (1995): „Economic Growth“. New York.
- CARRARO, C. / GALEOTTI, M. (1994): „WARM (World Assessment of Resource Management): Technical Report“. GRETA, Venice.
- CARRARO, C. / GALEOTTI, M. (1995): „Environmental Fiscal Reforms in A Federal Europe“. Paper Presented at International Symposium on „Economic Aspects of Environmental Policy Making in A Federation“, 14-16 June 1995.
- CHRISTENSEN, L.R. / JORGENSON, D.W. / LAU, J.L. (1973): „Transcendental Logarithmic Production Frontiers“. In: *Review of Economics and Statistics* 55, S. 28-45.
- COE, D.T. / HELPMAN, E. (1995): „International R&D Spillovers“. In: *European Economic Review* 39, S. 859-887.
- CONRAD, K. / SCHMIDT, T.F.N. (1995): „National Economic Impacts of an EU Environmental Policy - An Applied General Equilibrium Analysis“. ZEW-Discussion Paper No. 95-22. In: Proost, S. / Braden, J.B. (eds.), *Economic Aspects of Environmental Policy Making in a Federal System (II)*.
- CONRAD, K. (1993a): „The Economic Impact of Environmental Regulation: An AGE-Analysis under Alternative Treatments of Technical Change“. In: Diewert, E. / Spremann, K. / Stehling, F. (eds.), *Mathematical Modelling in Economics*. Springer Verlag, S. 603-615.
- CONRAD, K. (1993b): „Problems of Modelling CO₂ Reduction with GE Models“. In: Kuckshinrich, W. / Pfaffenberger, W. / Ströbele, W. (eds.), *Economics of the Greenhouse Effect*. Jülich, Bd. 13, S. 33-88.
- CONRAD, K. / HENSELER-UNGER, I. (1986): „Applied General Equilibrium Modelling for Longterm Energy Policy in the Fed. Rep. of Germany“. In: *Journal of Policy Modelling* 8 (4), S. 531-549.
- CONRAD, K. / SCHRÖDER, M. (1991): „The Control of CO₂ Emissions and Its Economic Impact: An AGE Model for a German State“. In: *Environmental and Resource Economics* 1, S. 289-312.
- DASGUPTA, P.J. / STIGLITZ, J. (1980): *Industrial Structure and the Nature of Innovative Activity*. In: *The Economic Journal* 90, S. 266-293.
- DEAN, A. / HOELLER, P. (1992): „Costs of Reducing CO₂ Emissions: Evidence From Six Global Models“. In: *OECD Economic Studies*, 19-Winter.
- DIEWERT, W.E. (1971): „An Application of the Shepard Duality Theorem: A Generalized Leontief Production Function“. In: *Journal of Political Economy*, S. 481-507.

- DIEWERT, W.E. / WALES, T.J. (1987): Flexible Functional Forms and Global Curvature Conditions“. In: *Econometrica*, Vol. 55, No. 1, S. 43-68.
- DOSI, G. (1988): „The Nature of the Innovative Process“. In: Dosi et al. (Ed.) *Technical Change and Economic Theory*. London, New York.
- DOWNING, P.B. / WHITE, L.J. (1986): Innovation in Pollution Control. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 13, S. 18-29.
- ERDMANN, G. (1993): *Elemente einer evolutorischen Innovationstheorie*, Verlag J.C.B. Mohr, Tübingen.
- FABER, M. / PROOPS, J.L.R. (1990): *Evolution, Time, Production and the Environment*. Berlin, Heidelberg.
- FREEMAN, CH. / PEREZ, C. (1988): „Structural Crisis of Adjustment, Business Cycles and Investment Behaviour“. In: Dosi, G. et al. (Ed.) *Technical Change and Economic Theory*. London, New York.
- FRITSCH, M. (1991): „Innovation und Strukturwandel“. In: *WISU*, Bd. 3, S. 195-200.
- GABISCH, G. (1992): „Konjunktur und Wachstum“. In: *Vahlens Kompendium der Wirtschaftstheorie und Wirtschaftspolitik*. Bd. 1, 5. Aufl.. München, S. 323-382.
- GERYBADAZE, A. (1988): *Innovation, Wettbewerb und Evolution*. Verlag J.C.B. Mohr, Tübingen.
- GRUBB, M. / EDMONDS, J. / BRINK, P. / MORRISON, M. (1993): „The Costs of Limiting Fossil-Fuel CO₂ Emissions, A Survey and Analysis“, *Annu. Rev. Energy Environ*, 18, S. 397-478.
- HENSELER-UNGER, I. (1986): „Ein dynamisches Modell des allgemeinen Gleichgewichts als Energiemodell für die Bundesrepublik Deutschland“, Peter Lang, Frankfurt am Main.
- JORGENSEN, D.W. / WILCOXEN, P. (1993): „Energy, Environment, and Economic Growth“. In: Kneese, A.V. / Sweeney, J.L. (eds.) *Handbook of Natural Resource and Energy-Economics*, Elsevier Science Publisher B.V., Vol. III, S. 1267-1390.
- KUMBHAKAR, S.C. (1994): „A Multiproduct Symmetric Generalized McFadden Cost Function“. In: *The Journal of Productivity Analysis*, No. 5, S. 349-357.
- KURZ, R. / GRAF, H.-W. / ZARTH, M. (1989): „Der Einfluß wirtschafts- und gesellschaftspolitischer Rahmenbedingungen auf das Innovationsverhalten von Unternehmen“. In: *Forschungsbericht Serie A*, Nr. 50 des Instituts für angewandte Wirtschaftsforschung Tübingen.
- LUCAS, R.E. (1988): „On the Mechanics of Economic Development“. In: *Journal of Monetary Economics* 22:3-42.
- MANNE, A. / MENDELSON, R. / RICHEL, R. (1995): „Merge - A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies“. In: *Energy Policy*, Vol.23 No.1, S. 17-34.

MENSBRUGGHE VAN DER, D. (1994): „GREEN, The Reference Manual“, OECD Economics Department Working Papers, No.143.

MILLIMAN, S.R. / PRINCE, R. (1989): Firm Incentives to Promote Technological Change in Pollution Control. In: Journal of Environmental Economics and Management 17, S. 247 - 265.

NELSON, R.R. / WINTER, S.G. (1982): An Evolutionary Theory of Economic Change. Harvard University Press. Cambridge, Mass.

PERELMAN, S. (1995): R&D, Technological Progress and Efficiency Change in Industrial Activities. In: Review of Income and Wealth. Series 41, No. 3, S. 349 - 366.

PETERS, I. (1995): „The Role of Technical Progress in Economic Models of Environmental Policy“, Paper presented at the Third International Workshop on Externality Costs. Ladenburg, Germany, May.

ROMER, P.M. (1990): „Endogenous Technological Change“. In: Journal of Political Economy. Vol. 98, No. 5, S. S71-S102.

SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN, SRU (1996): Umweltgutachten 1996. Zur Umsetzung einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung. Stuttgart.

SOLOW, R.M. (1956): „A Contribution to the Theory of Economic Growth“. In: Quarterly Journal of Economics, 70, S. 65-94.

SOLOW, R.M. (1959): „Investment and Technical Progress“. In: K.J. Arrow et al. [eds.], Mathematical Methods in Social Sciences.

WILCOXEN, P.J. (1988): „The effects of environmental regulation and energy prices on U.S. economic performance“. Harvard University, Cambridge, MA, USA.

WITT, U. (Hrsg.) (1993): Evolutionary Economics. Cambridge.

Anhang: Das GEM-E3-Modell

Das europäische angewandte allgemeine Gleichgewichtsmodell GEM-E3 wurde im Auftrag der Kommission der Europäischen Union (DGXII) von einem europäischen Forschungsverbund entwickelt.¹⁷

Die Spezifikations- und Implementierungsphase des Grundmodells ist weitgehend abgeschlossen, wobei das wesentliche Ziel die Entwicklung eines quantitativen Analyseinstruments zur Untersuchung von gesamtwirtschaftlichen und strukturellen Auswirkungen von umwelt-, energie- und wirtschaftspolitischen Maßnahmen in Europa war.

Eingruppierung und Untersuchungsschwerpunkte

GEM-E3 ist ein angewandtes allgemeines Gleichgewichtsmodell (AGE-Modell) für die EU-Mitgliedsstaaten, das die Politikbereiche Umwelt, Energie und Wirtschaft integriert abbildet. Das Modell ist der Gruppe der 'top-down' spezifizierten Energiewirtschaftsmodelle zuzurechnen. Die Subsysteme Energie und Umwelt werden in das 'dominierende' ökonomische Modell integriert. In der neueren Terminologie interdisziplinärer Modellierung werden Ansätze dieser Art auch als 'Integrated Assessment' Modelle bezeichnet. Der ökonomische Modellteil von GEM-E3 ist ein mikroökonomisch fundiertes Makromodell. Das Angebots- und Nachfrageverhalten der ökonomischen Agenten (bei Konsum, Produktion, Investition und Beschäftigung) wird nach dem Gewinn- oder Nutzenmaximierungsprinzip explizit formuliert. Das System der zugrundeliegenden Verhaltensabhängigkeiten ermöglicht eine konsistente Abbildung und Berücksichtigung der real beobachtbaren Interdependenz und Simultaneität ökonomischer Entscheidungen. Die mikroökonomische Spezifikation des Verhaltens kann daher als wesentlicher Unterschied und Vorteil gegenüber makroökonomischen Modellen und herkömmlichen statischen Input-Output-Modellen gesehen werden.

Die Untersuchungsschwerpunkte von GEM-E3 liegen in der

- Analyse von mittel- und langfristigen strukturellen Effekten alternativer Politiken auf sektoraler, nationaler und EU-weiter Ebene. Von besonderem Interesse ist dabei die Analyse von 'marktkonformen' Instrumenten in Energie- und/oder Umweltpolitik. Simuliert werden können z.B. verschiedene Konzeptionen von Energiesteuern, Emissionssteuern, Emissionszertifikaten sowie die Vorgabe von Standards auf sektoraler, nationaler und multinationaler Ebene.
- Analyse von Verteilungseffekten zwischen Ländern, Sektoren und sozialen Gruppen. Hierzu gehören z.B. Aspekte wie sektorale Belastung, Einkommensverteilung, Beschäftigung oder der Lastenausgleich im europäischen Kontext.

¹⁷ Die Autoren des Modells sind: Pantelis Capros & Takis Georgakopoulos (NTU-Athens), Stef Proost & Denise Van Regemorter (CES/KU-Leuven), Klaus Conrad & Tobias Schmidt (Universität Mannheim, ZEW-Mannheim), Norbert Ladoux & Marc Veille (CEA/GEMME-Toulouse), Peter McGregor (University of Strathclyde-Glasgow).

Allgemeine Modellcharakteristika

Die gleichgewichtige Lösung des Modells (Markträumung) ist das Ergebnis des Ausgleichs von Angebot und Nachfrage nach Gütern oder Faktoren. Dabei können verschiedene institutionelle Regimes und Markträumungsmechanismen spezifiziert werden. In der Basisversion werden die Agenten als Preisnehmer angenommen; es ist jedoch auch die Abbildung von unvollständigem Wettbewerb möglich.

Bei GEM-E3 handelt es sich um ein iterativ statisches Modell, d.h. die sequentiell aufeinanderfolgenden Periodengleichgewichte sind über Kapital- und Umweltschadensakkumulation miteinander verkoppelt. Maßgebliche Komponenten des dynamischen Modellverhaltens sind darüber hinaus der als autonom modellierte technische Fortschritt sowie die myopische (d.h. statische) Erwartungshaltung der Agenten.

GEM-E3 ist ein Mehrländer-Mehrsektoren-Modell der EU-12 mit endogenisiertem Handel von Gütern und Dienstleistungen. Derzeit wird das Modell um die neu hinzugekommenen Mitgliedsländer Schweden, Finnland und Österreich erweitert. Jedes Land wird als nationales AGE-Modell spezifiziert. Die Koppelung der Ländermodelle geschieht über die Außenhandelsverflechtungen, welche länderspezifisch und sektoral differenziert sind, d.h. für jedes der 11 Güter wird eine Handelsverflechtungsmatrix (11x11) endogen in Abhängigkeit des internationalen Preisgefüges generiert.

In der derzeitigen Implementierung (August 1996) werden 11 Sektoren differenziert, die ebenso viele Güter in geschachtelten CES-Produktionsfunktionen produzieren. Im Hinblick auf die energie- und umweltorientierte Ausrichtung des Modells wurde folgende Aggregation der Sektoren gewählt:

- Land-, Forst- u. Fischereiwirtschaft
- 4 Energiesektoren (Kohle, Öl, Gas, Elektrizität)
- 3 Industriesektoren (energieintensive Industrie, Investitionsgüter- und Konsumgüterindustrie)
- Verkehr
- 2 Dienstleistungssektoren (gewerbliche und öffentliche Dienstleistungen)

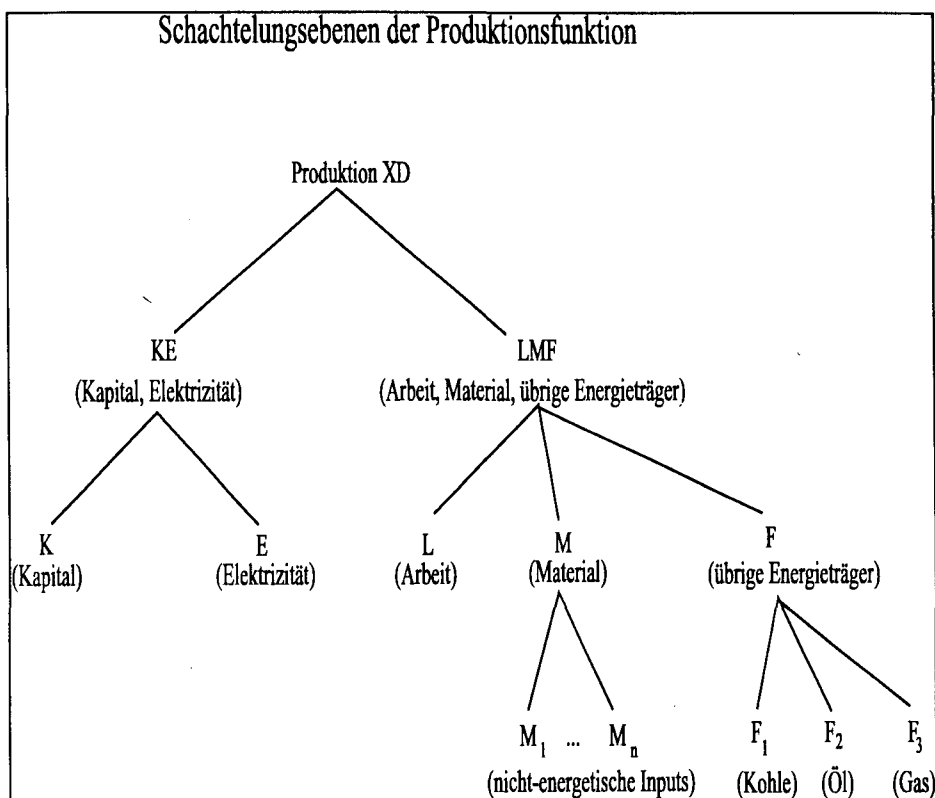


Abbildung A-1: Produktionsstruktur

Die Struktur der Schachtelung der Produktionsfunktion ist Abbildung A-1 zu entnehmen. Gegenüber traditionellen Input-Output-Modellen ermöglichen AGE-Modelle eine flexiblere, verhaltensorientierte Abbildung der ökonomischen Agenten. Je nach Wahl der Produktionsfunktion kann die Preisabhängigkeit der Vorleistungsstruktur mehr oder weniger flexibel spezifiziert werden. Wesentliches Kriterium für die Zusammenfassung mehrerer Komponenten zu einem Aggregat ist die Substitutionalität der Komponenten untereinander bzw. des Aggregats zu den Aggregaten der gleichen Stufe. Die Zusammenfassung von Elektrizität und Kapital ist ungewöhnlich - die meisten vergleichbaren Modellansätze verwenden auf der ersten Stufe eine KLEM Schachtelung (KLEM: capital, labour, energy, materials) -, sie entspricht aber den empirischen Erkenntnissen über den kurzfristig und mittelfristig eher komplementären Zusammenhang von Kapital und Elektrizität (mehr Maschinen erfordern einen höheren Einsatz an elektrischer Energie). Die Substitutionselastizität wird daher klein (≈ 0.1) gewählt.

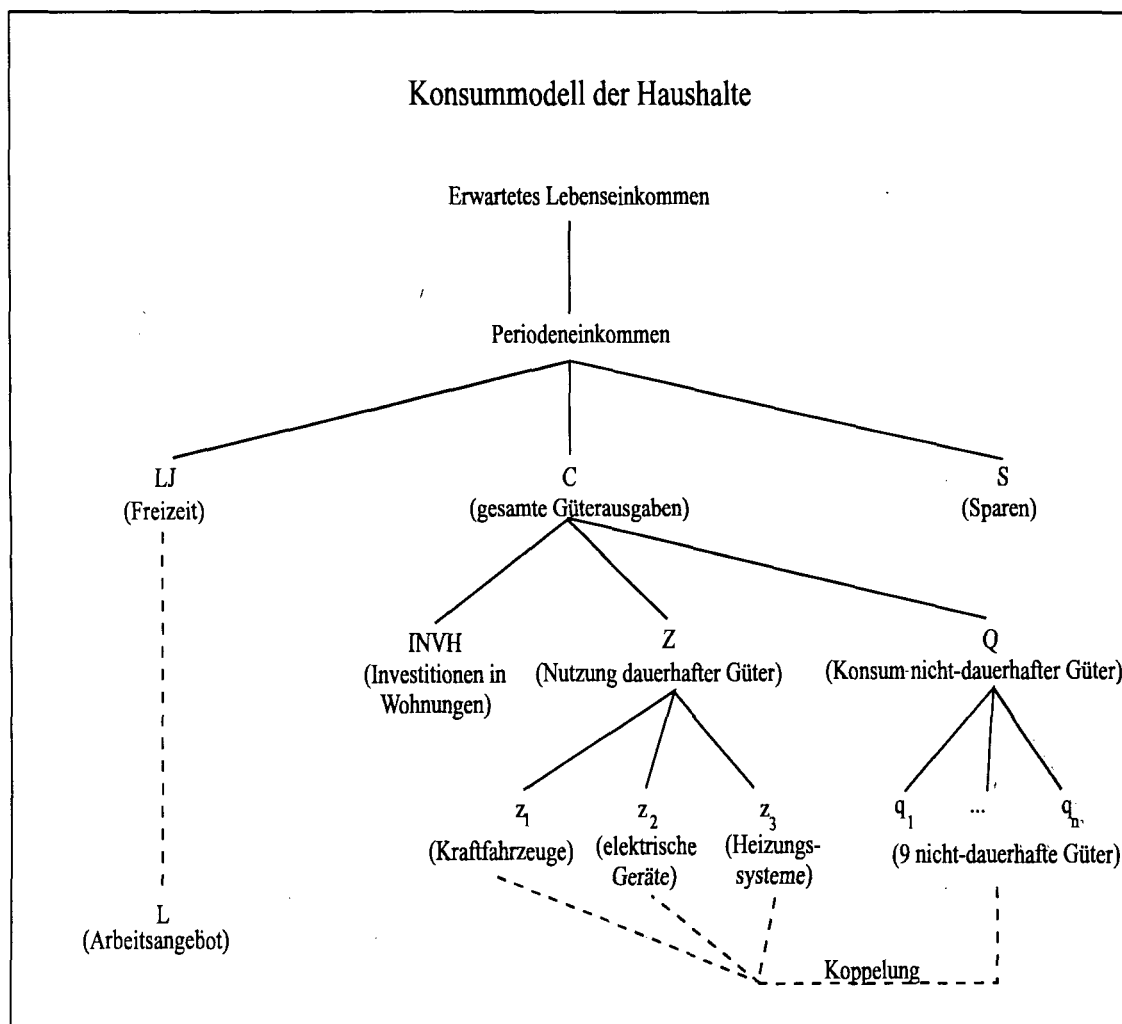


Abbildung A-2: Entscheidungsebenen im Konsummodell

Für die Haushalte werden 13 Ausgabenkategorien differenziert. Abbildung A-2 veranschaulicht die verschiedenen im Modell abgebildeten Entscheidungsebenen der Haushalte. In einem intertemporal abgeleiteten, erweiterten linearen Ausgabensystem werden dabei drei dauerhafte Konsumgüterkategorien (Kraftfahrzeuge, Heizungssysteme und elektrische Geräte), und neun nicht-dauerhafte Konsumgüterkategorien (Nahrungsmittel, Kultur, Gesundheit, Elektrizität, Gas, Kraftstoffe, übrige Energieträger, übriger Verkehr, Wohnung) nachgefragt. Um dem umwelt- bzw. energiepolitischen Ansatz gerecht zu werden, wird die Nutzung der dauerhaften Güter (Kraftfahrzeuge, Heizungssysteme, elektrische Geräte) an den Verbrauch von nicht-dauerhaften Konsumgütern (z.B. Kraftstoffe, Heizöl, Strom) gekoppelt. Diese Verhaltensspezifikation ermöglicht beispielsweise die Untersuchung der Auswirkungen einer Erhöhung der Mineralölsteuer auf die Neuanschaffung von Kraftfahrzeugen.

Die Transfer- und Verteilungsbeziehungen der vier Agenten 'Haushalte', 'Unternehmen', 'Staat' und 'Ausland' werden in einem in sich geschlossenen Rahmen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (SAM: 'Social Accounting Matrix') integriert abgebildet. Dabei werden elf Steuer- bzw. Einnahmearten des Staates berücksichtigt:

- direkte Steuern
- indirekte Steuern
- Energie- und Umweltsteuern
- Mehrwertsteuern
- Besitzsteuern (z.B. Kfz-Steuer),
- Kapitalsteuern
- Sozialversicherung
- Sozialleistungen
- Subventionen (Produktion und Export)
- Importzölle
- Auslandstransfers

Das Verhalten des Staates ist weitgehend exogen formuliert: Während die Einnahmen des Staates bei exogenen Steuer- und Leistungssätzen in Abhängigkeit der Besteuerungsgrundlagen (dies sind im wesentlichen Lohn- und Kapitaleinkommen sowie privater Verbrauch) variieren, werden die Ausgaben exogen vorgegeben. Das Staatsdefizit ergibt sich dann als Residualgröße aus der Differenz von Einnahmen und Ausgaben. Die Finanzierung des Defizits geht somit als variable Größe in die Identität von Investition und Sparen ein und beeinflusst somit das Investitionsvolumen der Unternehmen.

Umweltmodul

Das Umweltmodul des Modells beschränkt sich auf die Abbildung der beiden Problembereiche 'Klimaerwärmung' und 'Versauerung von Ökosystemen'. Um eine möglichst adäquate Berücksichtigung der wesentlichen Zusammenhänge in diesen Bereichen zu ermöglichen, wurden folgende Erweiterungen in das ökonomische Modell integriert:

- brennstoffabhängige Berechnung der energiebedingten Emissionen von Kohlendioxid (CO_2), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_x) für 11 Sektoren und Haushalte,
- Emissionsvermeidungskosten für SO_2 und NO_x , differenziert nach Sektoren und dauerhaften Konsumgütern,
- ein nach Ländern differenziertes Minimalausbreitungsmodell für SO_2 und NO_x (EMEP-Matrizen),
- Schadenskosten für Deposition von SO_2 und NO_x sowie CO_2 -Emissionen,
- ein Minimalklimamodell für CO_2 .

Umwelt- und/oder energiepolitischen Maßnahmen werden explizit in das unternehmerische Kostenminimierungskalkül bzw. das Nutzenmaximierungskalkül der Haushalte formuliert. Die

von diesen Maßnahmen betroffenen Inputs, Produktionsprozesse oder Produkte werden relativ teurer und verändern so die Vorleistungs- bzw. Nachfragestruktur der Produzenten bzw. Konsumenten.

Im Modell berücksichtigt sind bisher (für CO₂, SO₂ und NO_x)

- sektorale Emissionsstandards sowie Emissionsstandards für Kraftfahrzeuge und Heizungs-systeme von Haushalten,
- Emissionssteuer und/oder Energiesteuern (z.B. CO₂-Energiesteuer-Vorschlag der Europäischen Kommission),
- Emissionszertifikatsysteme mit nationaler und/oder multinationaler Handelbarkeit der Zertifikate für die Schadstoffe CO₂, SO₂ und NO_x mit unterschiedlichen Erstausgabemodi.

Bei der Vermeidung von Schadstoffemissionen werden zwei Technologietypen differenziert:

- Additive Vermeidungsmaßnahmen (end-of-pipe) sind als Vermeidungskostenfunktionen explizit formuliert. Die Installation dieser Anlagen (bzw. der von der Installation abhängige Vermeidungsgrad) kann endogen (bei Emissionssteuer oder -zertifikat) berechnet oder exogen (bei Standard) vorgegeben werden.
- Integrierte Vermeidungsmaßnahmen sind implizit durch die Substitution von Energieträgern bzw. den Einsatz emissionsextensiverer Produktionsverfahren dargestellt. Die Verfahrenswahl wird in Abhängigkeit der exogenen Parameter in der Produktionsfunktion von der relativen Preisstruktur bestimmt, d.h. teurere Energieinputs werden durch andere - je nach technologischen Möglichkeiten - substituiert.

Der aggregierte Vermeidungsgrad (additive und integrierte Maßnahmen) kann endogen (z.B. Emissions- und/oder Energiesteuer) oder exogen (z.B. bei Zertifikatesystem: ausgegebener Emissionswert) ermittelt werden.

Technologischer Wandel in GEM-E3

Zwei technologische Wirkungsmechanismen sind im Zusammenhang mit der Spezifikation der Produktion in GEM-E3 zu unterscheiden: Verfahrenswahl innerhalb einer bestehenden Technologie und technologische Weiterentwicklung.

- Substitutionale Produktionsfunktionen repräsentieren die zu einer bestehenden Technologie gehörige Menge von Produktionsverfahren. Die Verfahrenswahl und die dazugehörige Inputkonstellation wird in Abhängigkeit der technischen Möglichkeiten (Substitutionselastizitäten) und der relativen Preise modellendogen vorgenommen. Die Schachtelung der Produktionsfunktion und die Substitutionselastizitäten sind dagegen exogene Stellgrößen des Modells. Die Technologie von additiven Emissionsvermeidungsmaßnahmen ist dagegen vollständig exogen. Sowohl der (überproportionale) Verlauf der Emissionsvermeidungskosten als auch die Herstellungsbedingungen und der Betrieb der betreffenden Anlagen bleibt im Zeitverlauf unverändert.

- In der gegenwärtigen Version des Modells wird der Pfad der technologischen Entwicklung exogen vorgegeben. Autonomer technischer Fortschritt wird dabei als Parameter in der Produktionsfunktion spezifiziert und wirkt faktorsparend bzw. preissenkend. Je nach Sektor kommt sowohl faktorgebundener als auch faktorungebundener technischer Fortschritt vor.

Neben diesen beiden Wirkungsmechanismen wird der technologische Wandel noch durch eine Reihe von exogenen technologischen Stellgrößen determiniert.

Im Produktionsmodell kann bei technologischer Information über neue Produktionsverfahren die technische Fortentwicklung exogen modelliert werden:

- bei Spezifikation einer Leontief-Technologie durch exogene Vorgabe der (technologisch verbesserten) Vorleistungsstruktur.
- bei substitutionalen Produktionsverhältnissen durch exogene Variation der Substitutionselastizitäten oder Verteilungsparameter (z.B. Berücksichtigung einer höheren Flexibilität neuer Produktionsverfahren).
- bei Emissionsextensivierung der Produktion oder qualitativer Veränderung der Energieträger (schadstoffärmer) durch entsprechende Anpassung der Emissionskoeffizienten.
- bei verändertem Profil der additiven Vermeidungsmaßnahmen durch Variation des Kurvenverlaufs und/oder der Vorleistungsstruktur der entsprechenden Anlagen.

Auch im Konsummodell lassen sich Effizienzverbesserungen durch exogene Stellgrößen berücksichtigen:

- bei Verbesserung der Energieeffizienz in der Nutzung von dauerhaften Konsumgütern durch Reduktion des Koppelungsparameters zwischen dauerhaftem (z.B. Auto) und nicht-dauerhaftem Konsumgut (Kraftstoff) bzw. durch Veränderung des relativen Gewichts von fixem Anteil (durchschnittlicher Mindestverbrauch z.B. 8 Liter auf 100 km) und variablem Anteil (z.B. rasante Fahrweise, schlechte Wartung etc.) des Koppelungsparameters.
- bei Emissionsextensivierung des Konsums oder qualitativer Veränderung der Energieträger (schadstoffärmer) durch entsprechende Anpassung der Emissionskoeffizienten.